

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал ФГАО ВО
«Сибирский федеральный университет»
институт
«Электроэнергетика»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ Г. Н. Чистяков

подпись инициалы, фамилия

« _____ » _____ 20 ____ г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

код – наименование направления

«Двухдвигательный электропривод с последовательной коррекцией
координат»

тема

Руководитель

подпись, дата

профессор, д.т.н.

должность, ученая степень

В.П. Кочетков

инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

Е.А. Кириченко

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

подпись, дата

А. В. Коловский

инициалы, фамилия

Абакан 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Математическое описание объекта управления	5
1.1 Электрическая часть двухдвигательного электропривода	7
1.2 Механическая часть двухдвигательного электропривода	15
1.3 Трех-, двух - и одномассовая электромеханическая система поворота экскаватора	14
2 Синтез систем подчинённого регулирования	21
2.1 Трёхконтурная система подчинённого регулирования	28
2.2 Двухконтурная система подчинённого регулирования	32
2.3 Двухмассовые электромеханические системы с последовательной коррекцией координат	35
2.3.1 Четырёхконтурная система подчиненного регулирования	36
2.3.2 Пятиконтурная система подчиненного регулирования	43
3 Исследование динамики электропривода с последовательной коррекцией координат	52
3.1 Электропривод с двухконтурной системой подчинённого регулирования	52
3.2 Электропривод с трёхконтурной системой подчинённого регулирования	54
Заключение	61
Список использованных источников	62
Приложение А	65
Приложение Б	66
Приложение В.....	70
Приложение Г	74
Приложение Д.....	75

ВВЕДЕНИЕ

Карьерные экскаваторы применяются при разработке наиболее тяжелых, скальных пород. Наиболее типичным для наших карьеров является использование карьерных гусеничных экскаваторов большой и средней мощности, которые имеют электрический привод. Гусеничные экскаваторы, лопаты которых представляют средней производительности, являются самыми массовыми экскаваторами. В России ими выполняется большой объем земляных работ, связанных с сооружением каналов и гидротехнических устройств, разработкой полезных ископаемых открытым способом: на угольных разрезах, строительных карьерах, на железорудных карьерах горно-обогатительных комбинатов. Главным условием повышения эффективности производства открытых горных работ является совершенствование силовой части электромеханической системы управления технологическим процессом добычи, улучшение использования существующего оборудования при помощи автоматизации и оптимизации управления технологическими процессами экскавации.

Классически для привода главных механизмов применяются двигатели постоянного тока с независимым возбуждением, питаемые от регулируемых генераторов (система Г–Д) или регулируемых статических тиристорных преобразователей (система ТП–Д). Однако использование силовых тиристорных преобразователей для электропривода главных приводов приводит к снижению коэффициента мощности энергетической установки экскаватора, появлению дополнительных гармоник и колебаний напряжения в сети, что снижает качество электроснабжения карьера.

Поворотная платформа служит основанием для установленных на ней механизмов экскаватора и рабочего оборудования и составляет вместе с ними поворотную часть экскаватора. Рама поворотной платформы является одновременно корпусом противовеса экскаватора. На поворотной платформе установлены подъемная лебедка, механизм поворота, напорная лебедка, компрессор, кузов экскаватора, кабина машиниста с органами управления. Пово-

ротная платформа опирается на роликовый круг, лежащий на кольцевом рельсе ходовой тележки, и соединяется с ходовой тележкой центральной цапфой.

Характерными особенностями электроприводов поворота являются: во-первых, большие приведенные к валу двигателя инерционные массы поворотной платформы с оборудованием, стрелой и ковшом на значительном вылете, во-вторых, большое передаточное число и, в-третьих, наличие в кинематической цепи открытого зубчатого зацепления ведущей шестерни с неподвижным венцом, отличающегося невысокой точностью изготовления, работающего с консистентной смазкой и подверженного быстрому износу. Это определяет повышенный кинематический зазор и кинематическую погрешность передач, поэтому режимы разгона и торможения механизма поворота сопровождаются процессом зазорообразования и резонансными явлениями, когда максимальные броски упругого момента более чем в два раза могут превысить стопорное значение. Резонансные явления с зазорообразованиями вызывают вибрацию платформы, тряску и подобные явления в металлоконструкциях, которые затрудняют нормальную работу машины.

К электроприводу механизма поворота дополнительным требованием является обеспечение плавности протекания переходных процессов при отработке заданного угла поворота и минимально возможное время поворота с ограниченным ускорением. Это вызвано тем, что механизм поворота экскаватора лопаты, обладает значительным приведенным моментом инерции, в несколько раз превышающим момент инерции двигателя. Кроме того, вследствие большого значения передаточного числа в передаче имеются лифты и зазоры. Коэффициент отсечки для привода поворота целесообразно иметь в пределах $0,95 \dots 1$.

1 Математическое описание объекта управления

Современный карьерный экскаватор является сложной высокопроизводительной машиной, которая по насыщенности электрооборудованием, по общеустановленной мощности электрических машин сравнима со средним промышленным предприятием. Достигнуть совершенства технологического процесса экскавации можно за счёт совершенствования применяемого экскаваторного электропривода.

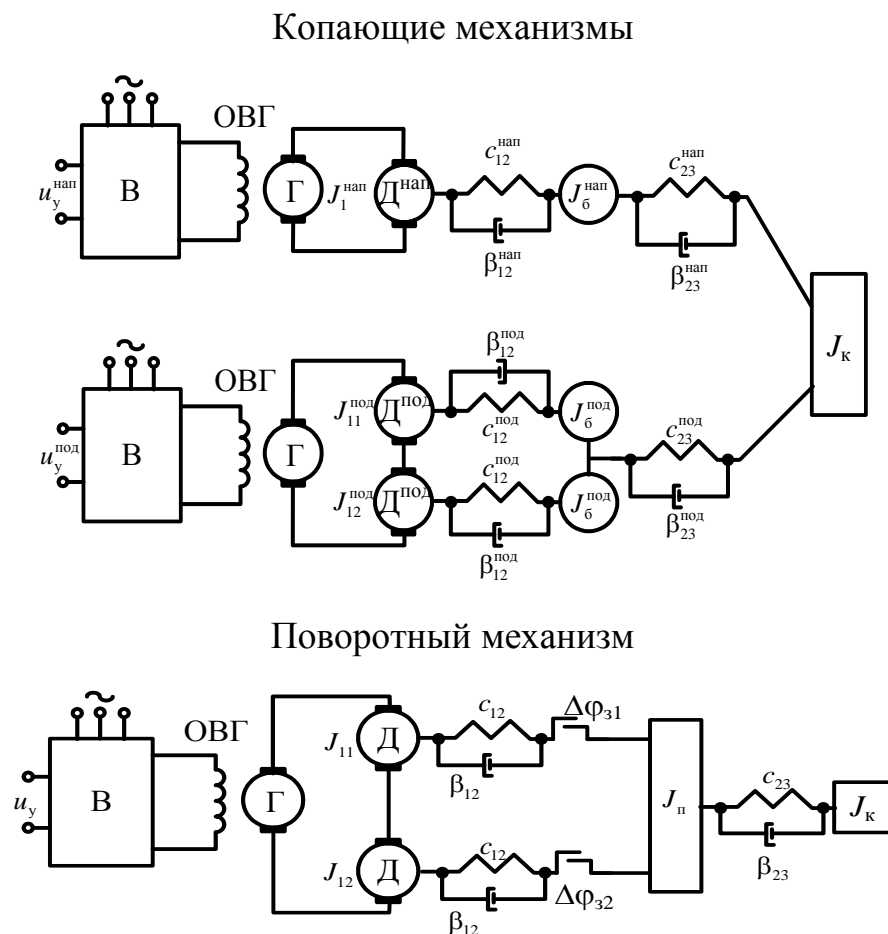


Рисунок 1.1 – Схема силовой части ЭМС карьерных экскаваторов

На рисунке 1.1 приведен один из примеров силовой части схемы электромеханической системы управления процессом экскавации карьерных экскаваторов. В схеме: ТВ – тиристорный возбудитель; ОВ – обмотка возбуждения генератора; Г – генератор; $Д^{\text{нап}}$, $Д^{\text{под}}$ – двигатели напора и подъема; Д –

двигатель поворота; $u_y^{\text{нап}}$, $u_y^{\text{под}}$, u_y – задающие воздействия на приводы напора, подъема и поворота; $J_1^{\text{нап}}$, $(J_1^{\text{под}})$ – приведенный к валу двигателя напора (подъема) суммарный момент инерции этого двигателя и его редуктора; J_{11} , J_{12} – приведенные к валам двигателей поворота суммарные моменты инерции этих двигателей и их редукторов; $J_6^{\text{нап}}$, $(J_6^{\text{под}})$ – приведенный к валу двигателя напора (подъема) момент инерции барабана; $J_{\text{п}}$ – приведенный момент инерции поворотной платформы экскаватора со стрелой; $J_{\text{к}}$ – приведенный момент инерции рукояти и ковша с грузом; $c_{12}^{\text{нап}}$, $c_{12}^{\text{под}}$, c_{12} – эквивалентные жесткости редукторов; $c_{23}^{\text{нап}}$, $c_{23}^{\text{под}}$ – эквивалентные жесткости канатов, c_{23} – эквивалентная жесткость рукояти; $\beta_{12}^{\text{нап}}$, $\beta_{12}^{\text{под}}$ – коэффициенты вязкого трения; $\Delta\varphi_{\square 1}$, $\Delta\varphi_{\square 2}$ – зазоры в передачах.

Все основные механизмы оборудованы индивидуальными электроприводами постоянного тока по системе «управляемый преобразователь – двигатель» (УП–Д), с силовым тиристорным преобразователем ТП–Д (система «тиристорный преобразователь – двигатель») или с машинным преобразователем Г–Д (генератор – двигатель). В качестве возбудителя генератора вначале применялись либо электромашинный усилитель, либо магнитный усилитель (система МУ–Г–Д), которые в настоящее время активно вытесняются тиристорным возбудителем (система ТВ–Г–Д) и транзисторным возбудителем (система ТрВ–Г–Д). Индивидуальный привод копающих механизмов либо однодвигательный, либо двухдвигательный. Индивидуальный привод для механизма поворота экскаваторов средней мощности – двухдвигательный, а для экскаваторов большой мощности трехдвигательный и четырехдвигательный.

Электроприводом переменного тока оборудована лишь небольшая серия экскаваторов в Российской Федерации и за рубежом, сейчас ведётся активное внедрение таких систем в работу горных машин.

1.1 Электрическая часть двухдвигательного электропривода

Наиболее распространенным на экскаваторах в настоящее время является электропривод по системе «генератор-двигатель», где генератор является вращающимся преобразователем или управляемым преобразователем, преобразующим переменное напряжение сети в регулируемое по величине постоянное напряжение [1].

Функциональная схема электропривода по системе «генератор-двигатель» изображена на рисунке 1.2.

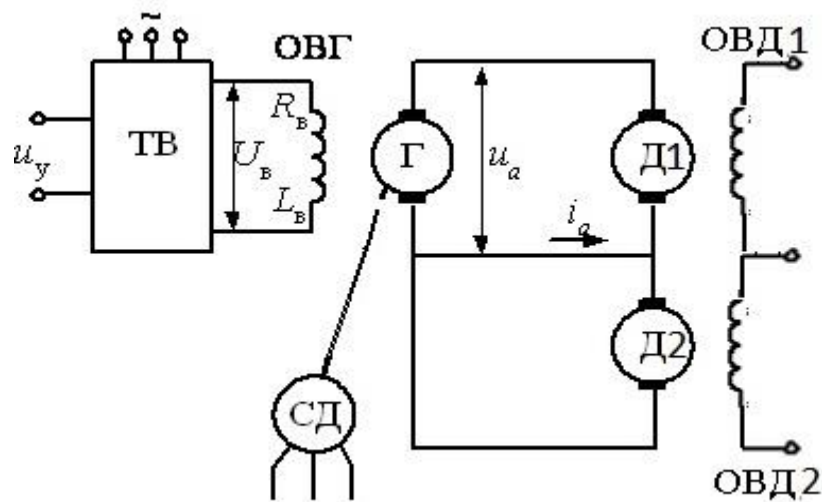


Рисунок 1.2 – Функциональная схема электропривода по системе «генератор-двигатель»

При разработке системы автоматического управления необходимо составление математической модели электропривода, начинающееся с разбиения функциональной схемы электропривода на структурные звенья, которое выполняют таким образом, чтобы структурное звено модели содержало не более одной постоянной времени.

Общепринятым является выделение следующих структурных звеньев электрической части двухдвигательного электропривода поворота экскаватора:

- тиристорный возбудитель ТВ для питания обмотки возбуждения генератора;
- генератор Г, являющийся электромеханическим преобразователем, питающим электродвигатель Д;
- якорная цепь ЯЦ двигателя;

Электрическая часть двухдвигательного электропривода описывается одним уравнением, определяющим процессы в обмотке возбуждения генератора, и одним уравнением, описывающим процессы в якорной цепи.

Функциональная схема электромеханической системы ТВ-Г-Д будет иметь вид, представленный на рисунке 1.3:

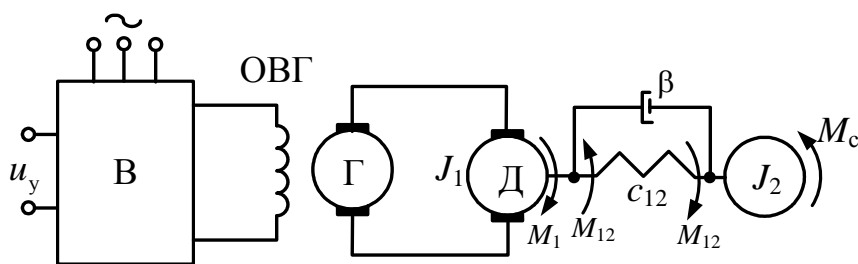


Рисунок. 1.3 – Функциональная схема двухмассовой ЭМС генератор – двигатель

Электрическая часть может быть описана при помощи баланса напряжений для цепи возбуждения генератора и якорной цепи в системе Г-Д [1]. При этом сначала возбудитель генератора принимаются безынерционными с коэффициентами передачи соответственно K_B и K_n , пренебрегается гистерезисом, насыщением магнитной цепи, рассеянием потока и влиянием вихревых токов генератора.

С учетом перечисленных допущений математические описания электрической части будут иметь следующий вид для системы Г-Д :

$$\begin{cases} K_B u_y = i_B R_B + L_B \frac{di_B}{dt} \\ K_n i_B = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + C_e \omega_1 \end{cases}, \quad (1.1)$$

где u_y – напряжение управления;

R_B – активное сопротивление обмотки возбуждения;

i_B – ток возбуждения генератора;

R_a – активное сопротивление якорной цепи;

i_a – ток якорной цепи;

C_e – электромагнитная конструктивная постоянная двигателя.

В канонической форме для системы Г-Д :

$$\begin{cases} \frac{di_B}{dt} = -\frac{R_B}{L_B} i_B + \frac{K_B}{L_B} u_y \\ \frac{di_a}{dt} = -\frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{C_e}{L_a} \omega_1 + \frac{K_\Gamma}{L_a} i_B \end{cases},$$

Остальные параметры вычисляются в соответствии со следующими выражениями:

Коэффициент передачи возбудителя:

$$K_B = U_B / U_{y.n},$$

где U_B – номинальное напряжение возбуждения генератора;

$U_{y.n}$ – номинальное напряжение управления.

Индуктивность генератора при допущении линейности:

$$L_B = (p_\Gamma N_\Gamma \Phi_{\Gamma.n}) / I_{B.n},$$

где p_Γ – число полюсов генератора;

N_Γ – число витков на полюсе генератора;

$\Phi_{\Gamma.n}$ – номинальный поток полюса генератора;

$I_{B.n}$ – номинальный ток возбуждения генератора.

Коэффициент передачи генератора:

$$K_\Gamma = U_{\Gamma.n} / I_{B.n},$$

где $U_{\Gamma.n}$ – номинальное напряжение генератора.

Активное сопротивление якорной цепи при системе Г-Д:

$$R_a = R_{a.д} + R_{a.г},$$

где $R_{a.д} = K_t (R_{я.д} + R_{д.п.д}) + R_{щ.д}$,

$R_{я.д}$ – сопротивление якоря двигателя;

$R_{д.п.д}$ – сопротивление дополнительных полюсов двигателя;

$R_{щ.д} = 2 / I_{д.н}$ – сопротивление щеток двигателя;

$I_{д.н}$ – номинальный ток двигателя,

$R_{a.г} = K_t (R_{я.г} + R_{д.п.г} + R_{к.о.г}) + R_{щ.г}$, $R_{я.г}$ – сопротивление якоря генератора;

$R_{д.п.г}$ – сопротивление дополнительных полюсов генератора;

$R_{щ.г} = 2 / I_{г.н}$ – сопротивление щеток генератора;

$I_{г.н}$ – номинальный ток генератора,

$R_{к.о.г}$ – сопротивление компенсационной обмотки генератора.

Индуктивность якорной цепи при системе Г-Д:

$$L_a = 2L_{a.д} + L_{a.г},$$

где $L_{a.д} = 0,6U_{д.н} / (p_d \omega_{д.н} I_{a.д.н})$ – индуктивность двигателя;

$\omega_{д.н}$ – номинальная частота вращения двигателя;

p_d – число полюсов двигателя;

$L_{a.г} = U_{г.н} / (p_g \omega_{г.н} I_{г.н})$ – индуктивность генератора;

$U_{г.н}$ – номинальное напряжение генератора;

$\omega_{г.н}$ – номинальная частота вращения генератора;

p_g – число полюсов генератора.

Конструктивная постоянная:

$$C = (U_{д.н} - I_{д.н} R_{a.д}) / \omega_{д.н}.$$

1.2 Механическая часть двухдвигательного электропривода

Рассмотрим, например, кинематическую схему электропривода поворота экскаватора ЭКГ – 8 (рисунок 1. 4). Аналогичную схему будут иметь экскаваторы ЭКГ-4.6, ЭКГ-5 и др. Здесь двигатели M_1 и M_2 через индивидуальные редукторы P_1 и P_2 приводят во вращение валы-шестерни ВШ1 и ВШ2, которые находятся в зацеплении с зубчатым венцом 3В, неподвижно закрепленным на базе Б (или на гусеничной тележке экскаватора). Валы - шестерни, обегая зубчатый венец, приводят во вращение поворотную платформу экскаватора П, опирающуюся на роликовый круг РК. Поворотная платформа соединена со стрелой, которая через рукоять соединена с ковшом (не показано на схеме).

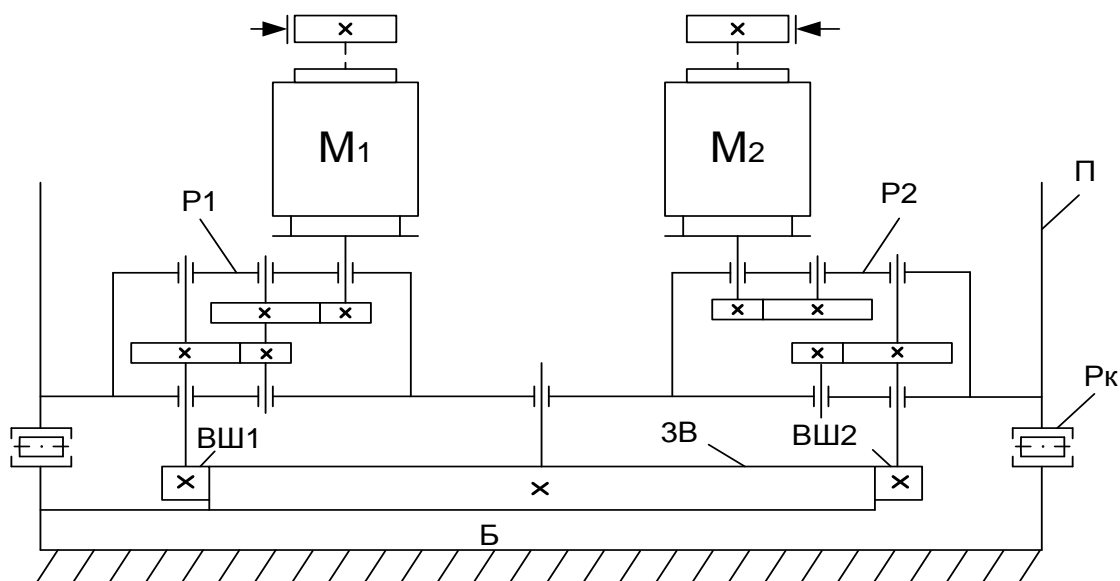


Рисунок 1.4 - Кинематическая схема механизма поворота

Расчет моментов инерции выполнен в [16] при помощи выражения:

$$J = GD^2 / k ,$$

где GD^2 - маховый момент,

k - коэффициент, зависящий от конфигурации детали.

Далее моменты инерции всех элементов вращающихся кинематических звеньев приводятся к валу двигателя через квадрат передаточного чис-

ла. Затем определяются суммарные приведенные моменты инерции каждого двигателя и его редуктора J_{11} и J_{12} , а также суммарный приведенный момент инерции поворотной платформы со стрелой J_n и суммарный приведенный момент инерции рукояти, выдвинутой на полную длину, и ковша с грузом J_k .

Расчет жесткостей валов редуктора, стрелы и рукояти также выполнен в [16], в результате которого по рассчитанным жесткостям элементов кинематической схемы получаем значения эквивалентных жесткостей c_{12} и c_{23} . При выборе зазоров возникают колебания упругих моментов, что приводит в основном к разрушению венцовой шестерни. Поэтому ограничиваемся трехмассовой системой, что, $c_{23} = \infty$, а $J_2 = J_n + J_k$. Это существенно упрощает математическое описание, погрешность при этом не превышает 8% [15]. В результате имеем следующую расчетную схему двухдвигательного механизма поворота экскаватора, показанную на рисунке 1. 5.

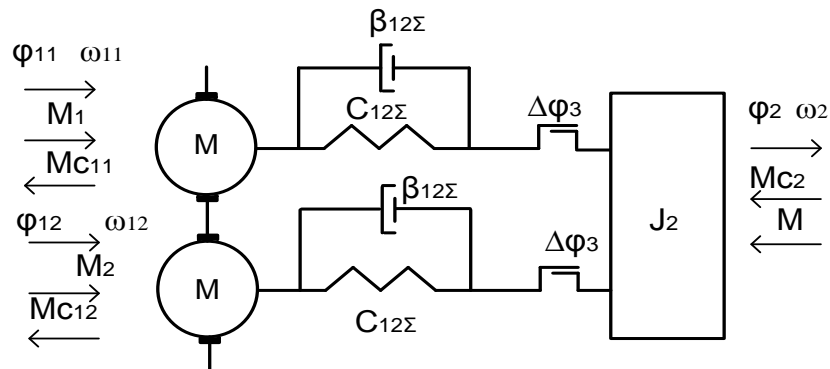


Рисунок 1.5 – Расчетная схема механизма поворота

Момент нагрузки электропривода определяется силами трения в двигателях (M_{c11} , M_{c12}) и в механизме (M_{c2}), ветровой нагрузкой и креном экскаватора (M_n). Однако с учетом всех факторов реальные статические нагрузки механизма поворота невелики и составляют около 10% от стопорного момента двигателя [7]. Основной нагрузкой электропривода являются силы инерции, действующие в переходных процессах пуска и торможения. В связи с

этим пренебрегаем моментом статическим, что позволяет при незначительной потере точности более наглядно показать переходные процессы по упругим моментам.

В результате механическая часть двухдвигательного электропривода поворота описывается пятью уравнениями

$$\begin{cases} J_{11} d\omega_{11} / dt = M_1 - M_{y1}, \\ J_{12} d\omega_{12} / dt = M_2 - M_{y2}, \\ M_{y1} = c_{12}(\phi_{11} - \phi_2) + \beta_{12}(\omega_{11} - \omega_2), \\ M_{y2} = c_{12}(\phi_{12} - \phi_2) + \beta_{12}(\omega_{12} - \omega_2), \\ J_2 d\omega_2 / dt = M_{y1} + M_{y2}. \end{cases} \quad (1.2)$$

где M_1, M_2 - моменты двигателей;

M_{y1}, M_{y2} - упругие моменты;

ϕ_{11}, ϕ_{12} - углы поворота двигателей;

ϕ_1, ϕ_2 - угол поворота и угловая скорость механизма.

Заменяя два двигателя одним эквивалентным, получаем следующее математическое описание механической части двухдвигательного электропривода поворота экскаватора [13]:

$$\begin{cases} J_{1\Sigma} d\omega_{1\Sigma} / dt = M_{\Sigma} - M_{y\Sigma}, \\ M_{y\Sigma} = c_{12\Sigma}(\phi_{1\Sigma} - \phi_2) + \beta_{12\Sigma}(\omega_{1\Sigma} - \omega_2), \\ J_2 d\omega_2 / dt = M_{y\Sigma}. \end{cases}$$

Математическое описание механической части одномассовой системы имеет вид:

$$J_{\Sigma} d\omega_{\Sigma} / dt = M_{y\Sigma}$$

Таким образом в зависимости от целей исследования и степени упрощения механизм поворота экскаватора может быть представлен различными структурными схемами, которые соответствуют математическим моделям одно-, двух- или трёхмассовых систем.

1.3 Трёх-, двух - и одномассовые электромеханические системы поворота экскаватора

Расчётная схема ЭМС поворота экскаватора с учётом (1.1) и (1.2) представлена на рисунке 1. 6.

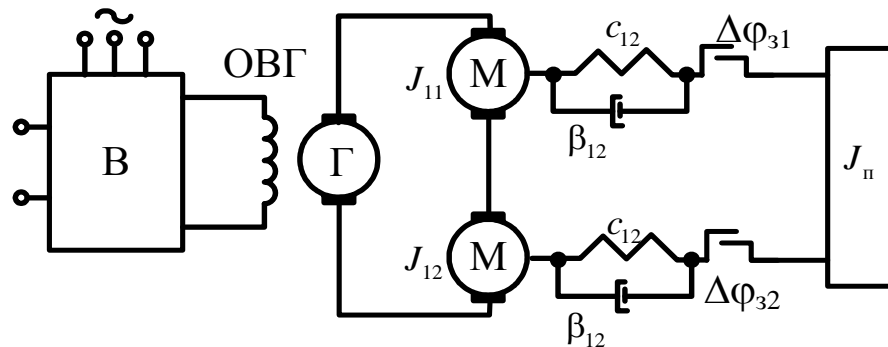


Рисунок 1.6 – Расчетная схема трёхмассовой ЭМС

Математическая модель трехмассовой системы без учета зазоров:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_B u_y = i_B R_B + L_B di_B / dt \\ K_\Gamma i_B = i_a R_a + L_a di_a / dt + C_e \omega_1 \\ J_{11} d\omega_{11} / dt = M_1 - M_{y1}, \\ J_{12} d\omega_{12} / dt = M_2 - M_{y2}, \\ M_{y1} = c_{12}(\phi_{11} - \phi_2) + \beta_{12}(\omega_{11} - \omega_2), \\ M_{y2} = c_{12}(\phi_{12} - \phi_2) + \beta_{12}(\omega_{12} - \omega_2), \\ J_2 d\omega_2 / dt = M_{y1} + M_{y2}. \end{array} \right. \quad (1.3)$$

Используя систему уравнений (1.3), построим структурную схему (рис. 1. 8) трехмассовой системы объекта управления. В схеме e_z , $T_z = L_B / R_B$ – ЭДС и постоянная времени генератора, $T_a = L_a / R_a$ – постоянная времени якорной цепи, C_E , C_M – коэффициенты пропорциональности между угловой скоростью и ЭДС, током и моментом двигателя (в системе единиц СИ $C = C_E = C_M$), $K_a = 1/R_a$. Динамические нагрузки механического оборудования в реальных условиях в значительной мере возрастают из-за ударов, возникающих при выборе зазоров в передачах. При том зависимость упругого момента от разности углов поворота двигателя и механизма имеет вид звена нечувствительности, поэтому в схему введены соответствующие нелинейные элементы. В этом случае уравнения для упругих моментов имеют вид:

$$\begin{cases} M_{y1} = c_{12}(\phi_{11} - \phi_2 \pm \Delta\phi_{31} / 2) + \beta_{12}p(\phi_{11} - \phi \pm \Delta\phi_{31} / 2), \text{ при } |\phi_{11} - \phi_2| > \Delta\phi_{31} / 2, \\ M_{y1} = 0, \text{ при } |\phi_{11} - \phi_2| \leq \Delta\phi_{31} / 2, \\ M_{y2} = c_{12}(\phi_{12} - \phi_2 \pm \Delta\phi_{32} / 2) + \beta_{12}p(\phi_{12} - \phi_2 \pm \Delta\phi_{32} / 2), \text{ при } |\phi_{12} - \phi_2| > \Delta\phi_{32} / 2, \\ M_{y2} = 0, \text{ при } |\phi_{12} - \phi_2| \leq \Delta\phi_{32} / 2. \end{cases}$$

Математическая модель данного трехмассового объекта управления будет использоваться для получения переходных процессов системы, в том числе для исследования динамики электропривода с различными зазорами в передачах. Для других целей исследования, главным образом для синтеза регуляторов электропривода, для анализа поведения системы без учета зазоров, а также с одинаковыми зазорами в передачах целесообразно упростить ее до двух- и до одномассовой системы. Заменяя два двигателя одним эквивалентным, получаем следующую расчетную схему ЭМС механизма поворота одноковшового экскаватора (рис. 1. 7).

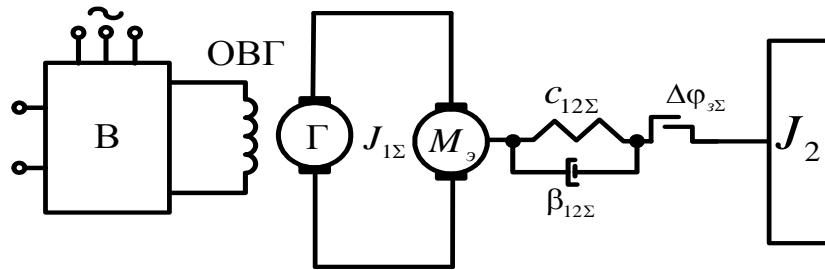


Рисунок. 1.7 – Расчётная схема двухмассовой ЭМС

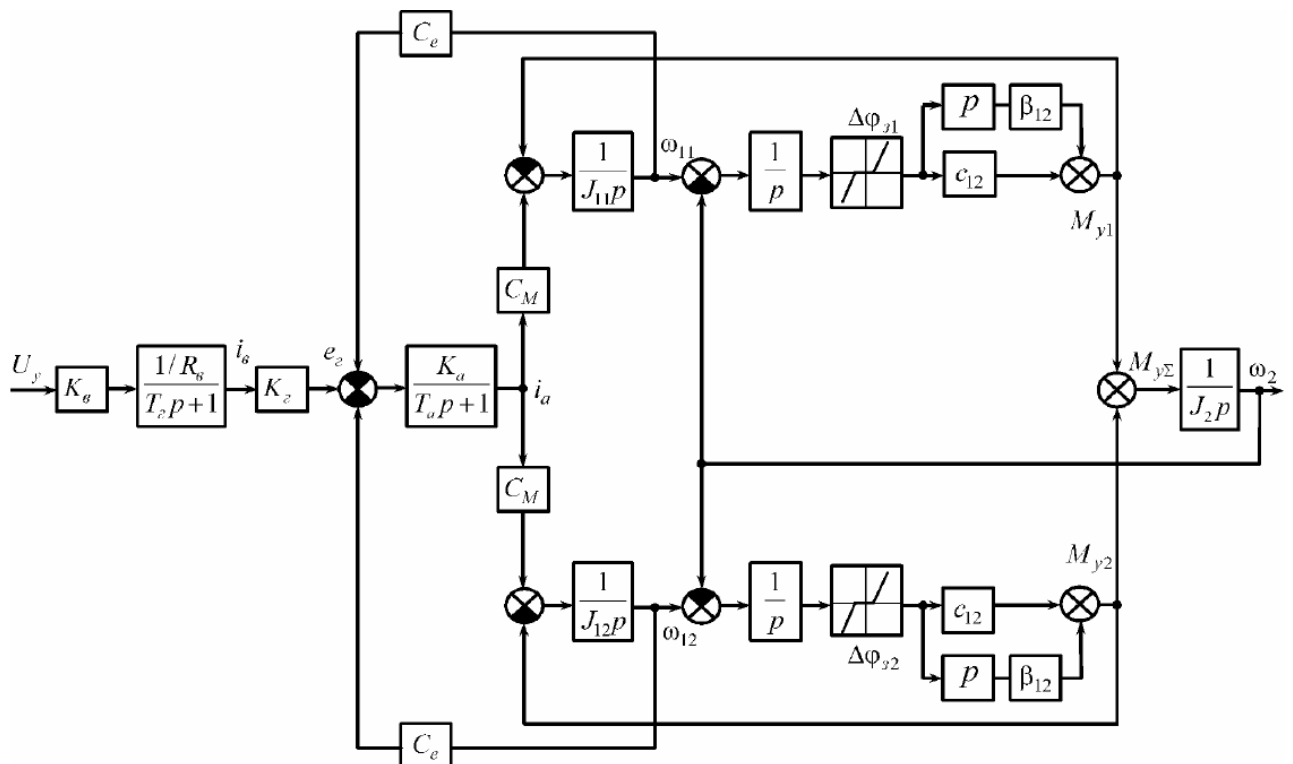


Рисунок 1.8 – Структурная схема трехмассовой ЭМС

На рисунке 1.7 M_3 – эквивалентный двигатель,

$J_{1\Sigma} = J_{11} + J_{12}$ – приведенный момент инерции эквивалентного двигателя с редуктором,

$c_{12\Sigma} = 2c_{12\Sigma}$, $\beta_{12\Sigma} = 2\beta_{12\Sigma}$ – эквивалентная жесткость и коэффициент вязкого трения редуктора эквивалентного двигателя,

$\Delta\varphi_3$ – зазор в передаче.

Несмотря на разнообразие схем основных механизмов экскаваторов лопат с индивидуальным приводом, полные расчетные схемы их как упругих

динамических систем мало отличаются друг от друга и достаточно точно могут быть представлены двухмассовой системой [13]. Для синтеза регуляторов электропривода и для анализа поведения системы без учета зазоров, а также с одинаковыми зазорами в передачах целесообразно использовать двух- и одномассовые системы рассмотренные выше[13].

Математическое описание двухмассовой электромеханической системы с электроприводом по системе генератор–двигатель:

$$\begin{cases} \frac{di_{\text{в}}}{dt} = -\frac{R_{\text{в}}}{L_{\text{в}}}i_{\text{в}} + \frac{K_{\text{в}}}{L_{\text{в}}}u_{\text{в}} \\ \frac{di_{\text{а}}}{dt} = \frac{K_{\text{г}}}{L_{\text{а}}}i_{\text{в}} - \frac{R_{\text{а}}}{L_{\text{а}}}i_{\text{а}} - \frac{C_{\text{е}}}{L_{\text{а}}}\omega_1 \\ \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{C_{\text{м}}}{J_1}i_{\text{а}} - \frac{1}{J_1}M_{\text{у}} \\ \frac{dM_{\text{у}}}{dt} = c_{12}(\omega_1 - \omega_2) + \beta_{\text{в.т}}(\omega_1 - \omega_2) \\ \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_2}M_{\text{у}} - \frac{1}{J_2}M_{\text{с}} \end{cases} \quad (1.4)$$

Структурная схема двухмассовой системы объекта управления, описываемая системой уравнений (1.4), изображена на рисунке 1.9.

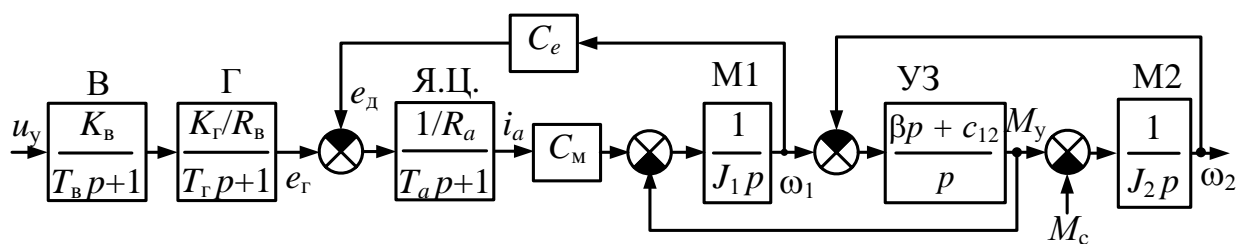


Рисунок 1.9. Структурная схема двухмассовой ЭМС генератор–двигатель.

В схеме $C_{\text{м}} = C_{\text{е}} = C$, в системе СИ, $T_{\text{в}} = 0,01$ с – постоянная времени возбудителя генератора,

$T_{\Pi} = 0,005\text{--}0,01$ с – постоянная времени преобразователя,

$T_{\Gamma} = \frac{L_{\text{Б}}}{R_{\text{Б}}}$ – постоянная времени возбуждения генератора,

$T_a = \frac{L_a}{R_a}$ – постоянная времени якорной цепи.

Часто при синтезе систем управления пренебрегают упругими связями в передачах и ЭМС рассматривают одномассовой. Математическая модель одномассовой системы типа Г-Д представлена следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di_{\text{Б}}}{dt} = \frac{K_{\text{Б}}}{L_{\text{Б}}} u_{\text{y}} - \frac{R_{\text{Б}}}{L_{\text{Б}}} i_{\text{Б}} \\ \frac{di_a}{dt} = \frac{K_{\Gamma}}{L_a} i_{\text{Б}} - \frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{C_e}{L_a} \omega_{\Sigma} , \\ \frac{d\omega_{\Sigma}}{dt} = \frac{C_{\text{М}}}{J_{\Sigma}} i_a - \frac{1}{J_{\Sigma}} M_{\text{с}} \end{cases} \quad (1.5)$$

где ω_{Σ} – угловая скорость одномассовой системы,

$J_{\Sigma} = J_1 + J_2$ – суммарный приведенный момент инерции.

Структурная схема одномассовой системы объекта управления, описываемая системой уравнений (1.5), изображена на рисунке 1.10.

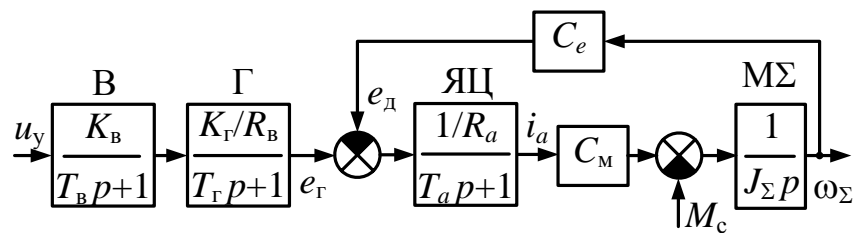


Рисунок 1.10. Структурная схема одномассовой ЭМС с электроприводом по системе генератор – двигатель

Для удобства исследования динамики представим математическую модель системы в относительных единицах, тогда координаты электропривода рассматриваются относительно их базовых значений. Для этого каждое звено умножим на входную базовую величину и разделим на выходную базовую величину. В качестве базовых для напряжений управления, возбуждения, якорной цепи, тока возбуждения, и угловых скоростей выбираем соответствующие номинальные значения. Для тока якорной цепи в качестве базового принимаем максимальное (стопорное) значение тока якоря двигателя, для момента – максимальный суммарный момент всех двигателей.

В относительных единицах имеем: $K_B^* = \frac{K_B U_{y.б}}{U_{B.б}}$, $K_i^* = \frac{\hat{E}_i U_{ó.á}}{U_{a.á}}$, $K_r^* = 1$,

$$R_B^* = 1, C_e^* = C_m^* = 1, R_a^* = \frac{R_a I_{a.б}}{U_{a.б}}, J_1^* = \frac{J_1 \omega_б}{M_б}, c_{12}^* = \frac{c_{12} \omega_б}{M_б}, J_2^* = \frac{J_2 \omega_б}{M_б}, J_\Sigma^* = \frac{J_\Sigma \omega_б}{M_б}.$$

Все дальнейшие расчеты ведутся в относительных единицах, поэтому знак звездочки опускаем.

Часто при анализе и синтезе управления системы с несколькими выходными координатами и управляющими воздействиями удобно математическое описание представлять в векторно-матричной форме. Для этого в четвертое уравнение системы (1.2) и третье уравнение системы (1.3) подставим значения производных скоростей первой и второй массы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_B}{dt} = -\frac{1}{T_r} i_B + \frac{K_B R_B}{T_r} u_y \\ \frac{di_a}{dt} = \frac{K_r R_a}{T_a} i_B - \frac{1}{T_a} i_a - \frac{R_a C_e}{T_a} \omega_1 \\ \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{C_m}{J_1} i_a - \frac{1}{J_1} M_y \\ \frac{dM_y}{dt} = \frac{\beta_{B.T} C_m}{J_1} i_a + c_{12} \omega_1 - \beta_{B.T} \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2} M_y - c_{12} \omega_2 \\ \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_2} M_y - \frac{1}{J_2} M_c \end{array} \right.$$

Таким образом, математическое описание экскаваторного электропривода в векторно-матричной форме будет иметь вид:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u + \mathbf{d}f,$$

где $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$ – n -мерный вектор состояния системы,

u – управление,

f – возмущение (M_c) \mathbf{A} – $n \times n$ -мерная матрица коэффициентов ЭМС,

\mathbf{b} – матрица-вектор коэффициентов при управлении размера $n \times 1$,

\mathbf{d} – матрица-вектор коэффициентов при возмущении размера $n \times 1$

Для двухмассовой ЭМС:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_B \\ i_a \\ \omega_1 \\ M_y \\ \omega_2 \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_r} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_r R_a}{T_a} & -\frac{1}{T_a} & -\frac{C_e R_a}{T_a} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C_M}{J_1} & 0 & -\frac{1}{J_1} & 0 \\ 0 & \frac{\beta_{B.T} C_M}{J_1} & c_{12} & \beta_{B.T} \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2} & c_{12} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_2} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \frac{K_B R_B}{T_r} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{J_2} \end{bmatrix}^{\delta}.$$

для одномассовой ЭМС:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_B \\ i_a \\ \omega_1 \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_\Gamma} & 0 & 0 \\ \frac{K_\Gamma R_a}{T_a} & -\frac{1}{T_a} & -\frac{C_e R_a}{T_a} \\ 0 & \frac{C_M}{J_\Sigma} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \frac{K_{\hat{a}} R_{\hat{a}}}{T_{\hat{a}}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{d} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{J_\Sigma} \end{bmatrix}.$$

Таким образом, в зависимости от целей исследования и степени упрощения механизм поворота экскаватора может быть представлен различными структурными схемами, которые соответствуют математическим моделям одно-, двух- или трехмассовой систем.

2 Синтез систем подчиненного регулирования

Главной задачей электропривода является быстроедействие при соответствующем характере переходного процесса. Этим требованиям отвечают системы подчиненного регулирования координат электропривода. Координаты корректируются последовательно, начиная с внутренних, при этом внутренний контур подчиняется внешнему. [4]

Рассмотрим классическую трехконтурную систему подчиненного регулирования и нетрадиционные двух-, четырех- и пятиконтурные системы подчиненного регулирования.

2.1 Трехконтурная система подчиненного регулирования

Классической является трехконтурная система подчиненного регулирования (СПР) тока возбуждения, тока якорной цепи и скорости двигателя, применяемая к одномассовой электромеханической системе (ЭМС), представленная на рисунке 2.1. Она является классической, так как каждая постоянная времени компенсируется отдельным регулятором.

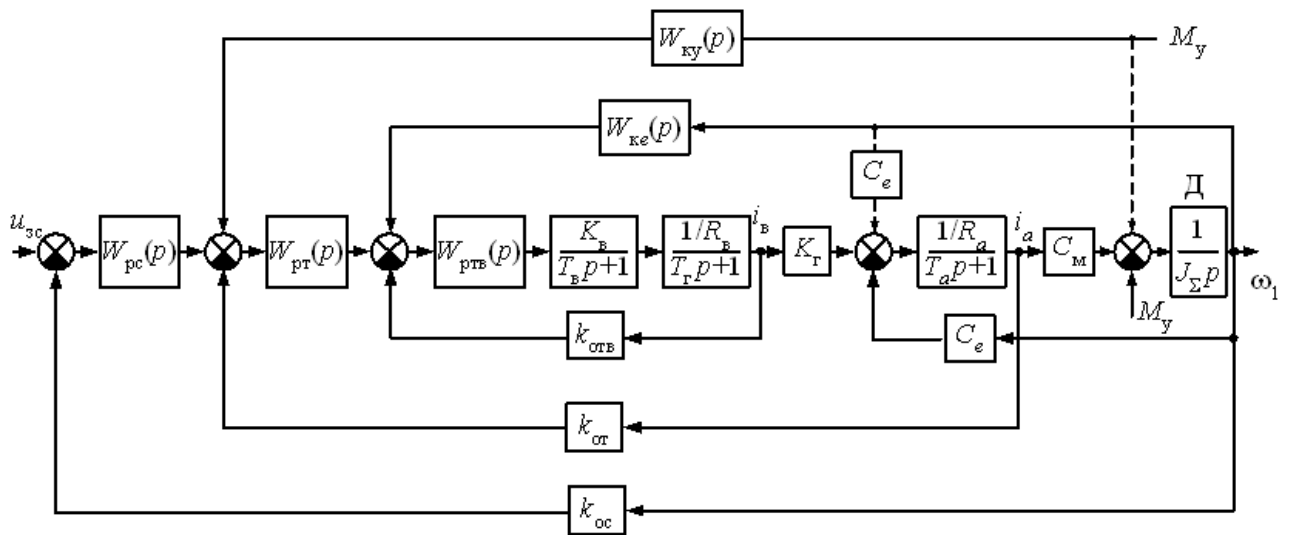


Рисунок 2.1 – Структурная схема одномассовой ЭМС с трехконтурной СПР

а) Контур тока возбуждения

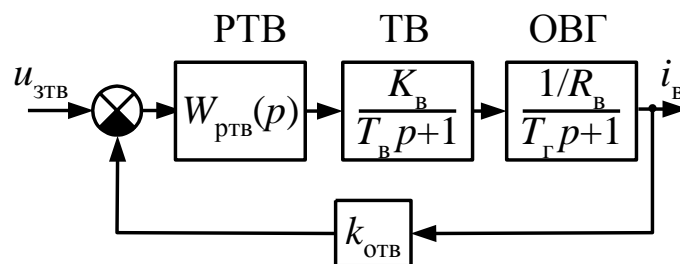


Рисунок 2.2 – Структурная схема контура тока возбуждения

Обозначим передаточную функцию регулятора тока возбуждения $W_{ptb}(p)$. Некомпенсируемую постоянную времени принимаем равной постоянной времени возбудителя, то есть $T_\mu = T_B = 0,01\text{с}$, что справедливо при безинерционном датчике и регуляторе.

Передаточная функция разомкнутого контура тока возбуждения

$$W_{\text{раз.тв}}(p) = W_{\text{рТВ}}(p)W_{\text{тв}}(p)W_{\text{обг}}(p)k_{\text{отв}} = W_{\text{рТВ}}(p)\frac{K_{\text{в}}}{T_{\mu}p+1}\frac{1/R_{\text{в}}}{T_{\Gamma}p+1}k_{\text{отв}} \quad (2.1)$$

где $k_{\text{отв}} = \frac{U_{\text{зТВ}}}{I_{\text{вн}}}$ – коэффициент обратной связи по току возбуждения;

$U_{\text{зТВ}}$ – напряжение задания по току возбуждения, равное номинальному напряжению управления;

$I_{\text{вн}}$ – номинальный ток возбуждения генератора.

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{\text{раз.тв}}^{\text{ж}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)} \quad (2.2)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточные функции разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)} = W_{\text{рТВ}}(p)\frac{K_{\text{в}}}{T_{\mu}p+1}\frac{1/R_{\text{в}}}{T_{\Gamma}p+1}k_{\text{отв}} \quad (2.3)$$

Сократив обе части на $(T_{\mu}p+1)$, находим передаточную функцию регулятора

$$W_{\text{рТВ}}(p) = \frac{R_{\text{в}}(T_{\Gamma}p+1)}{2T_{\mu}K_{\text{в}}k_{\text{отв}}p} = \frac{R_{\text{в}}T_{\Gamma}}{2T_{\mu}K_{\text{в}}k_{\text{отв}}} + \frac{R_{\text{в}}}{2T_{\mu}K_{\text{в}}k_{\text{отв}}p} = \underbrace{\frac{T_{\Gamma}}{T_{\text{и1}}}}_{\text{П}} + \underbrace{\frac{1}{T_{\text{и1}}}}_{\text{И}} \frac{1}{p}, \quad (2.4)$$

где $T_{\text{и1}} = 2T_{\mu}K_{\text{в}}k_{\text{отв}} / R_{\text{в}}$.

Полученный регулятор пропорционально-интегральный

(ПИ-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура тока возбуждения:

$$W_{\text{зктв}}(p) = \frac{W_{\text{рТВ}}(p)W_{\text{ТВ}}(p)W_{\text{обГ}}(p)}{1 + W_{\text{рТВ}}(p)W_{\text{ТВ}}(p)W_{\text{обГ}}(p)k_{\text{отв}}}; \quad (2.5)$$

$$W_{\text{зктв}}(p) = \frac{1/k_{\text{отв}}}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)+1} \approx \frac{1/k_{\text{отв}}}{2T_{\mu}p+1}, \quad (2.6)$$

Обозначим $2T_{\mu}=T_{\mu 2}$ – некомпенсируемые постоянные времени второго контура.

б) Контур тока якорной цепи

Структурная схема контура тока якорной цепи представлена на рисунке 2.3.

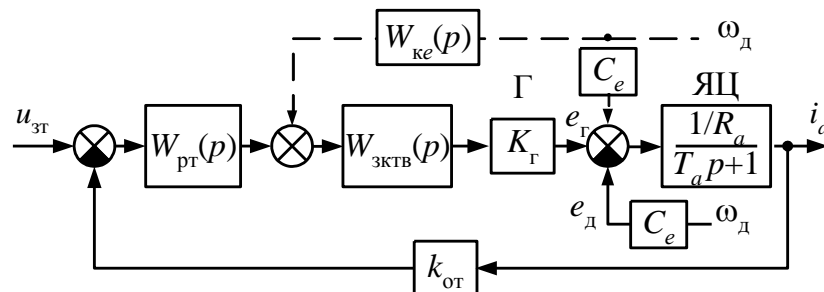


Рисунок 2.3 – Структурная схема контура тока якорной цепи

Для синтеза регулятора тока пренебрегаем обратной связью по ЭДС двигателя (в дальнейшем мы учтем ее действие при помощи коррекции по ЭДС), тогда передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{\text{раз.тя}}(p) = W_{\text{рт}}(p)W_{\text{зктв}}(p)W_{\text{яц}}(p)K_{\Gamma}k_{\text{от}}, \quad (2.7)$$

где $k_{\text{от}} = \frac{U_{\text{зт}}}{I_{\text{стоп}}}$ – коэффициент обратной связи по току якорной цепи;

$U_{\text{зт}}$ – напряжение задания по току якорной цепи, равное номинальному напряжению управления;

$I_{\text{стоп}}$ – стопорный ток якоря двигателя.

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{\text{раз.тя}}^{\text{ж}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu 2}p(T_{\mu 2}p + 1)} \quad (2.8)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточные функции разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{\mu 2}p(T_{\mu 2}p + 1)} = W_{\text{рт}}(p) \frac{1/R_a}{T_a p + 1} \frac{1/k_{\text{отв}}}{T_{\mu 2}p + 1} K_{\Gamma}k_{\text{от}} \quad (2.9)$$

Находим передаточную функцию регулятора

$$W_{\text{рт}}(p) = \frac{k_{\text{отв}} R_a (T_a p + 1)}{2T_{\mu 2} K_{\Gamma} k_{\text{от}} p} = \underbrace{\frac{T_a}{T_{\mu 2}}}_{\text{П}} + \underbrace{\frac{1}{T_{\mu 2}} \frac{1}{p}}_{\text{И}}, \quad (2.10)$$

где $T_{\mu 2} = 2T_{\mu 2} K_{\Gamma} k_{\text{от}} / R_a k_{\text{отв}}$

Полученный регулятор пропорционально-интегральный (ПИ-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура

$$W_{\text{зктв}}(p) = \frac{W_{\text{рт}}(p)W_{\text{яц}}(p)W_{\text{зктв}}(p)K_{\text{г}}}{1 + W_{\text{рт}}(p)W_{\text{яц}}(p)W_{\text{зктв}}(p)K_{\text{г}}k_{\text{от}}} = \frac{1/k_{\text{от}}}{2T_{\mu 2}p(T_{\mu 2}p + 1) + 1} \approx \frac{1/k_{\text{от}}}{2T_{\mu 2}p + 1}, \quad (2.11)$$

Обозначим $2T_{\mu 2} = T_{\mu 3}$.

в) Контур скорости

В одномассовой системе нет сумматора 2. А так как результаты синтеза одномассовой системы мы затем распространяем на двухмассовую электромеханическую систему, то фактически существует внутреннее возмущающее воздействие по упругому моменту. Им при синтезе регулятора скорости мы пренебрегаем и в дальнейшем должны учесть при помощи коррекции по упругому моменту.

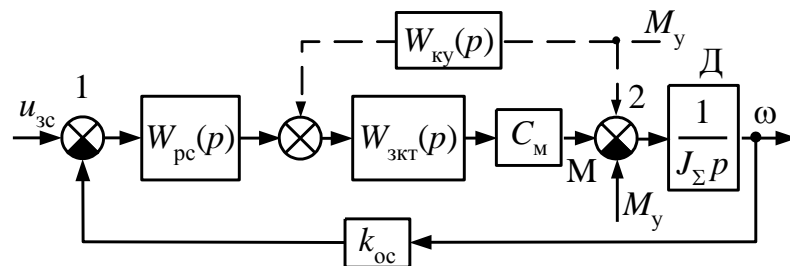


Рисунок 2.4 – Структурная схема контура скорости

K_{oc} – коэффициент обратной связи по угловой скорости двигателя, $K_{oc} = \frac{U_{3c}}{\omega_{дн}}$

U_{3c} – напряжение задания по скорости двигателя, равное номинальному напряжению управления;

$\omega_{дн}$ – номинальная угловая скорость двигателя.

Передаточная функция разомкнутого контура скорости

$$W_{\text{раз.с}}(p) = W_{\text{рс}}(p)W_{\text{д}}(p)W_{\text{зкт}}(p)k_{\text{ос}} \quad (2.12)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{\text{раз.с}}^{\text{ж}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu 3}p(T_{\mu 3}p + 1)} \quad (2.13)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточные функции разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{\mu 3}p(T_{\mu 3}p + 1)} = W_{\text{рс}}(p) \frac{C_{\text{мс}}}{J_{\Sigma}p} \frac{1/k_{\text{от}}}{T_{\mu 3}p + 1} k_{\text{ос}} \quad (2.14)$$

Находим передаточную функцию регулятора

$$W_{\text{рс}}(p) = \frac{k_{\text{от}}J_{\Sigma}}{2T_{\mu 3}C_{\text{мс}}k_{\text{ос}}} = k_{\text{рс}}, \quad (2.15)$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура скорости

$$W_{\text{зкс}}(p) = \frac{W_{\text{рс}}(p)W_{\text{д}}(p)W_{\text{зкт}}(p)}{1 + W_{\text{рс}}(p)W_{\text{д}}(p)W_{\text{зкт}}(p)k_{\text{ос}}} = \frac{1/k_{\text{ос}}}{2T_{\mu 3}p(T_{\mu 3}p + 1) + 1} \approx \frac{1/k_{\text{ос}}}{2T_{\mu 3}p + 1}, \quad (2.16)$$

Учтем существующую обратную связь по ЭДС двигателя. Внутренний контур объекта регулирования необходимо компенсировать вводом аналогичной обратной связи, но с противоположным знаком. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи при подаче ее на регулятор тока возбуждения

$$W_{ке}(p) = \frac{C_e}{K_{\Gamma} W_{зктв}(p)} \quad (2.17)$$

Уточненная передаточная функция замкнутого контура тока возбуждения:

$$W_{зктв}(p) = \frac{1/k_{отв}}{2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1}$$

$$W_{ке}(p) = \frac{C_{es} k_{отв}}{K_{\Gamma}} (2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1) = \frac{2T_{\mu}^2 k_{отв} C_{es}}{K_{\Gamma}} p^2 + \frac{2T_{\mu} k_{отв} C_{es}}{K_{\Gamma}} p + \frac{k_{отв} C_{es}}{K_{\Gamma}} \quad (2.18)$$

Таким образом, вводится положительная обратная связь по скорости и ее первой и второй производным с соответствующими коэффициентами.

Учтем влияние внутренней обратной связи по упругому моменту. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи на регулятор тока якорной цепи

$$W_{ку}(p) = \frac{1}{C_{ms} W_{зкт}(p)} = 2T_{\mu 2}^2 \frac{k_{от}}{C_{ms}} p^2 + 2T_{\mu 2} \frac{k_{от}}{C_{ms}} p + \frac{k_{от}}{C_{ms}} \quad (2.19)$$

Таким образом, чтобы скомпенсировать влияние внутренней обратной связи по упругому моменту, необходимо ввести на регулятор тока якорной цепи сигналы положительных обратных связей по упругому моменту, его первой и второй производным с соответствующими коэффициентами.

2.2 Двухконтурная система подчиненного регулирования

На рисунке 2.5 представлена структурная схема двухконтурной системы подчиненного регулирования.

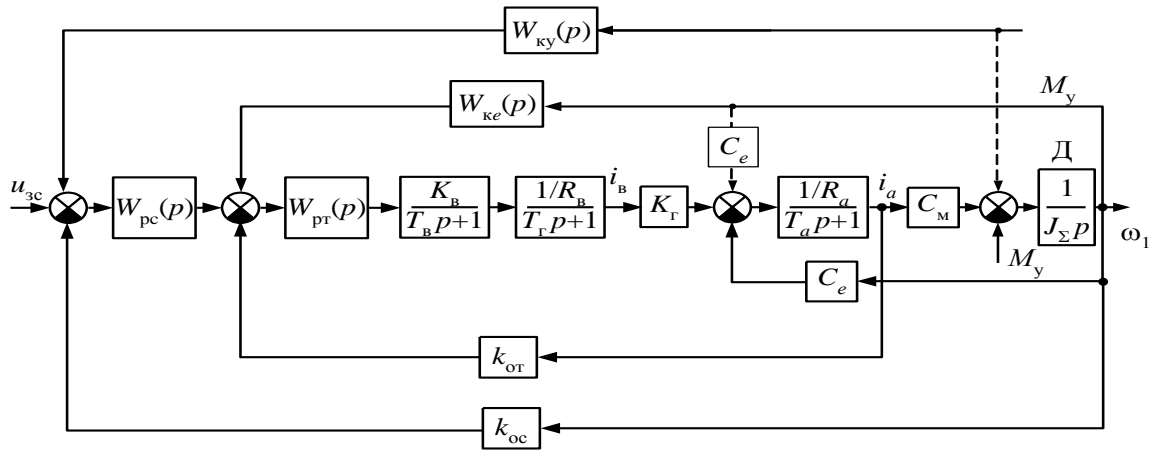


Рисунок 2.5 – Структурная схема ЭМС с двухконтурной СПР

а) Контур тока якорной цепи

Структурная схема контура тока якорной цепи представлена на рисунке 2.6

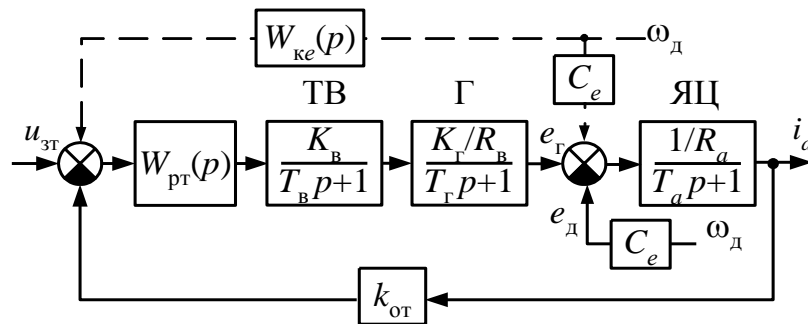


Рисунок 2.6 – Структурная схема контура тока якорной цепи

Некомпенсируемую постоянную времени принимаем равной постоянной времени возбудителя, то есть $T_{\mu}=T_{\text{в}}=0,01\text{с}$, что справедливо при безинерционном датчике и регуляторе.

Пренебрегаем обратной связью по ЭДС, тогда передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{\text{раз.тя}}(p) = W_{\text{пт}}(p)W_{\text{тв}}(p)W_{\text{овг}}(p)W_{\text{яц}}(p)K_{\Gamma}k_{\text{от}}, \quad (2.20)$$

где $k_{от}$ – коэффициент обратной связи по току якорной цепи, $k_{от} = \frac{U_{зт}}{I_{стоп}}$

$U_{зт}$ – напряжение задания по току якорной цепи, равное номинальному напряжению управления;

$I_{стоп}$ – стопорный ток якоря двигателя.

$$K_{O.T} = \frac{U_{зт}}{I_{стоп}}$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{раз.тя}^{ж}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)}. \quad (2.21)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{\mu 2}p(T_{\mu 2}p + 1)} = W_{пт}(p) \frac{K_B}{T_B p + 1} \frac{1/R_B}{T_{\Gamma}p + 1} \frac{1/R_a}{T_a p + 1} K_{\Gamma} k_{от} \quad (2.22)$$

Находим передаточную функцию регулятора

$$W_{пт}(p) = \frac{R_B R_a (T_{\Gamma}p + 1)(T_a p + 1)}{2T_{\mu} K_B K_{\Gamma} k_{от} p} = \underbrace{\frac{T_{\Gamma} + T_a}{T_{и}}}_{\Pi} + \underbrace{\frac{1}{T_{и}} \frac{1}{p}}_{И} + \underbrace{\frac{T_{\Gamma} \cdot T_a}{T_{и}}}_{Д} p, \quad (2.23)$$

где $T_{и} = 2T_{\mu} \cdot K_B \cdot K_{\Gamma} \cdot K_{от} / (R_B \cdot R_a)$

Полученный регулятор пропорционально - интегрально - дифференциальный (ПИД-регулятор).

$$W_{PT}(p) = \frac{T_\Gamma + T_A}{T_H} + \frac{1}{T_H p} + \frac{T_\Gamma \cdot T_A}{T_H} \cdot p$$

Передаточная функция замкнутого контура

$$W_{зктя}(p) = \frac{W_{PT}(p)W_{TB}(p)W_{OBF}(p)K_\Gamma W_{ЯЦ}(p)}{1 + W_{PT}(p)W_{TB}(p)W_{OBF}(p)K_\Gamma W_{ЯЦ}(p)k_{OT}} = \frac{1/k_{OT}}{2T_\mu^2 p^2 + 2T_\mu p + 1}, \quad (2.24)$$

$$W_{зктя}(p) \approx \frac{1/k_{OT}}{2T_\mu p + 1}, \quad (2.25)$$

Обозначим $2T_\mu = T_{\mu 2}$.

б) Контур скорости

В одномассовой системе нет сумматора 2. А так как результаты синтеза одномассовой системы мы затем распространяем на двухмассовую электромеханическую систему, то фактически существует внутреннее возмущающее воздействие по упругому моменту. Им при синтезе регулятора скорости мы пренебрегаем и в дальнейшем должны учесть при помощи коррекции по упругому моменту.

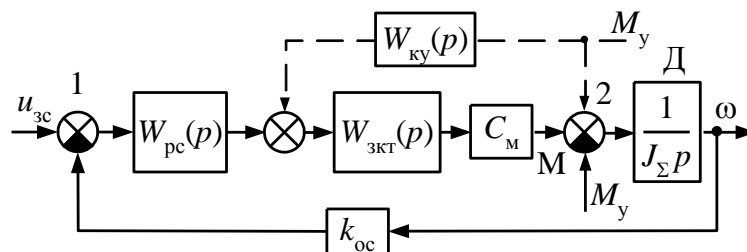


Рисунок 2.7 – Структурная схема контура скорости

где K_{oc} – коэффициент обратной связи по угловой скорости двигателя;

$$K_{oc} = \frac{U_{3c}}{\omega_{дн}};$$

U_{3c} — напряжение задания по скорости двигателя, равное номинальному напряжению управления;

$\omega_{дн}$ — номинальная угловая скорость двигателя.

Пренебрегаем внутренней обратной связью, по упругому моменту, которая физически существует, когда переходим к двухмассовой электромеханической системе. Это влияние мы учтем в дальнейшем.

Передаточная функция разомкнутого контура скорости

$$W_{раз.с}(p) = W_{pc}(p) \frac{C_m}{J_{\Sigma} p} \frac{1/k_{от}}{T_{\mu 2} p + 1} k_{oc}. \quad (2.26)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{раз.с}^{ж}(p) = \frac{1}{2T_{\mu 2} p (T_{\mu 2} p + 1)}. \quad (2.27)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{\mu 2} p (T_{\mu 2} p + 1)} = W_{pc}(p) \frac{C_m}{J_{\Sigma} p} \frac{1/k_{от}}{T_{\mu 2} p + 1} k_{oc} \quad (2.28)$$

Находим передаточную функцию регулятора

$$W_{pc}(p) = \frac{k_{от} J_{\Sigma}}{2T_{\mu 2} C_{ms} k_{oc}} = k_{pc}. \quad (2.29)$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура скорости

$$W_{\text{зкс}}(p) = \frac{W_{\text{рс}}(p)W_{\text{д}}(p)W_{\text{зкт}}(p)}{1 + W_{\text{рс}}(p)W_{\text{д}}(p)W_{\text{зкт}}(p)k_{\text{ос}}} = \frac{1/k_{\text{ос}}}{2T_{\mu 2}p(T_{\mu 2}p + 1) + 1} \approx \frac{1/k_{\text{ос}}}{2T_{\mu 2}p + 1} \quad (2.30)$$

Учтем существующую обратную связь по ЭДС двигателя. Внутренний контур объекта регулирования необходимо компенсировать вводом аналогичной обратной связи, но с противоположным знаком. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи при подаче ее на регулятор тока якорной цепи

$$W_{\text{ке}}(p) = \frac{C_{\text{ес}}(T_{\mu}p + 1)(T_{\text{г}}p + 1)R_{\text{в}}}{K_{\text{в}}K_{\text{г}}W_{\text{рт}}(p)} \quad (2.31)$$

$$W_{\text{ке}}(p) = C_{\text{ес}} \frac{(T_{\mu}p + 1)(T_{\text{г}}p + 1)R_{\text{в}}}{K_{\text{в}}K_{\text{г}}} \frac{T_{\mu 2}K_{\text{в}}K_{\text{г}}k_{\text{от}}p}{(T_{\text{г}}p + 1)(T_{\text{а}}p + 1)R_{\text{в}}R_{\text{а}}} = \frac{T_{\mu 2}C_{\text{ес}}k_{\text{от}}}{R_{\text{а}}} \frac{(T_{\mu}p + 1)}{(T_{\text{а}}p + 1)} p$$

Учтем внутреннюю обратную связь по упругому моменту. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи по упругому моменту, заводимая на регулятор скорости

$$W_{\text{ку}}(p) = \frac{1}{C_{\text{м}}W_{\text{зкт}}(p)W_{\text{рс}}(p)} \quad (2.33)$$

$$W_{\text{ку}}(p) = \frac{2T_{\mu 2}k_{\text{ос}}}{J_{\Sigma}} (2T_{\mu 2}^2p^2 + 2T_{\mu 2}p + 1) \quad (2.34)$$

Таким образом, чтобы скомпенсировать влияние внутренней обратной связи по упругому моменту, необходимо ввести на регулятор тока якорной цепи сигналы положительных обратных связей по упругому моменту, его первой и второй производной с соответствующими коэффициентами.

2.3 Двухмассовые электромеханические системы с последовательной коррекцией координат

Одномассовую систему, как правило, рассматривают в предварительных расчетах при синтезе, а дальнейший анализ проводят для двухмассовой электромеханической системы, которая включает структурную схему двухмассовой механической системы и электрической части электропривода по систем

ТВ- Г-Д. Двухмассовая структурная схема объекта управления без учета действия внутреннего демпфирования изображена на рисунке 2.8.

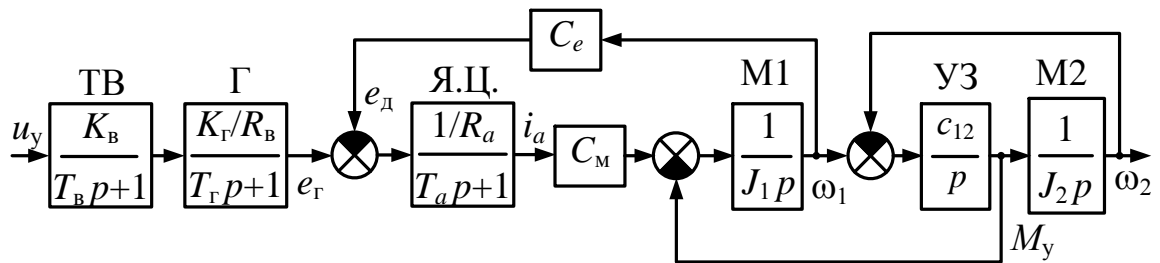


Рисунок 2.8 – Структурная схема двухмассовой электромеханической системы

Для двухмассового объекта регулирования могут использоваться многоконтурные системы подчиненного регулирования, то есть от регулирования скорости двигателя переходим к регулированию скорости механизма. При этом для синтеза регуляторов временно пренебрегаем перекрестными связями по ЭДС, упругому моменту и скорости механизма, которые будут компенсироваться в дальнейшем. Система электропривода в этом случае может быть четырех- либо пятиконтурная с дополнительными регуляторами упругого момента PM_y и скорости второй массы PC_2 (исполнительного механизма), на которые поступают сигналы обратных связей по этим координатам с соответствующими коэффициентами [5].

2.3.1 Четырехконтурная система подчиненного регулирования

Для двухмассового объекта регулирования могут использоваться многоконтурные системы подчиненного регулирования, то есть от регулирования скорости двигателя переходим к регулированию скорости механизма. При этом для синтеза регуляторов временно пренебрегаем перекрестными связями по ЭДС, упругому моменту и скорости механизма, которые будут компенсироваться в дальнейшем. Система электропривода в этом случае может быть четырех- либо пятиконтурная с дополнительными регуляторами упругого момента PM_u и скорости второй массы PC_2 (исполнительного механизма), на которые поступают сигналы обратных связей по этим координатам с соответствующими коэффициентами.

Четырехконтурная система подчиненного регулирования отличается от пятиконтурной отсутствием контура тока возбуждения, что делает систему более быстродействующей. Ее структурная схема показана на рисунке 2.9.

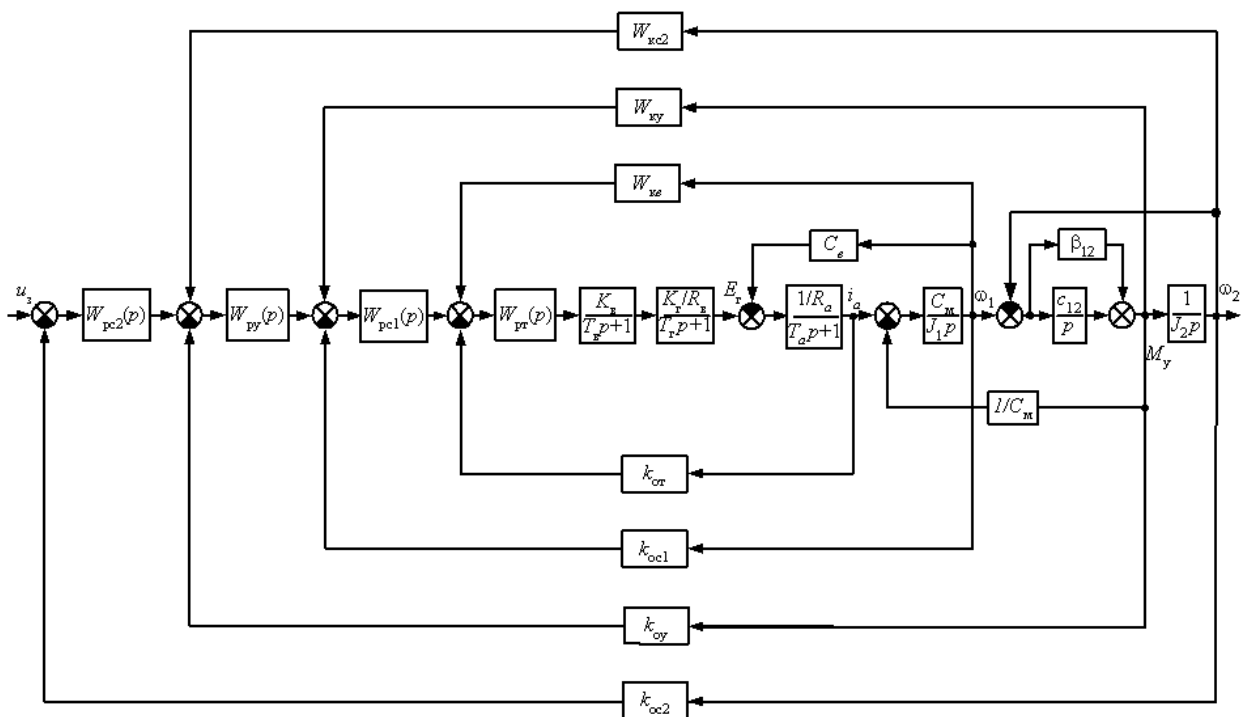


Рисунок 2.9 – Структурная схема четырехконтурной системы подчиненного регулирования

а) Контур тока якоря

Аналогичен рассмотренному при синтезе двухконтурной системы подчиненного регулирования, поэтому:

Передаточная функция регулятора:

$$W_{PT}(p) = \frac{T_\Gamma + T_A}{T_{II}} + \frac{1}{T_{II}p} + \frac{T_\Gamma \cdot T_A}{T_{II}} \cdot p$$

Передаточная функция замкнутого контура тока якоря

$$W_{зктя}(p) = \frac{1/K_{OT}}{2T_\mu p + 1}$$

Обозначим $2T_\mu = T_{\mu 2}$.

б) Контур скорости двигателя

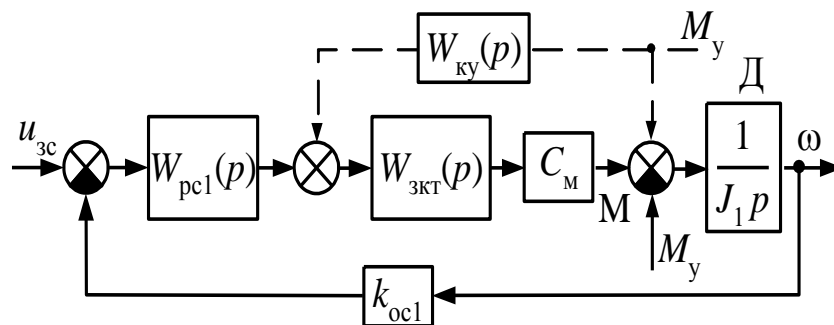


Рисунок 2.10 – Структурная схема контура скорости двигателя

Передаточная функция разомкнутого контура скорости двигателя

$$W_{раз.кл}(p) = W_{pcl}(p)W_{зкт}(p)W_d(p)k_{ocl} = W_{pcl}(p) \frac{1/k_{от}}{T_{\mu 2}p + 1} \frac{C_{MS}}{J_1 p} k_{ocl}. \quad (2.35)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{\text{раз.с}}^{\text{ж}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu 2}p(T_{\mu 2}p + 1)}. \quad (2.36)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура скорости двигателя

$$\frac{1}{2T_{\mu 2}p(T_{\mu 2}p + 1)} = W_{\text{pc1}}(p) \frac{C_{\text{мс}}}{J_1 p} \frac{1/k_{\text{от}}}{T_{\mu 2}p + 1} k_{\text{oc1}} \quad (2.37)$$

Находим передаточную функцию регулятора скорости двигателя

$$W_{\text{pc1}}(p) = \frac{k_{\text{от}} J_1}{2T_{\mu 2} C_{\text{мс}} k_{\text{oc1}}} = k_{\text{pc1}}, \quad (2.38)$$

где $k_{\text{oc1}} = k_{\text{oc2}} = k_{\text{oc}} = \frac{U_{\text{зс1}}}{\omega_{\text{дн}}}$ – коэффициент обратной связи по скорости двигателя.

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура скорости двигателя

$$W_{\text{зс1}}(p) = \frac{W_{\text{pc1}}(p)W_{\text{д}}(p)W_{\text{зкт}}(p)}{1 + W_{\text{pc1}}(p)W_{\text{д}}(p)W_{\text{зкт}}(p)k_{\text{oc1}}} = \frac{1/k_{\text{oc1}}}{2T_{\mu 2}p(T_{\mu 2}p + 1) + 1} \approx \frac{1/k_{\text{oc1}}}{2T_{\mu 2}p + 1} \quad (2.39)$$

Обозначим $2T_{\mu 2} = T_{\mu 3}$.

в) Контур момента упругого

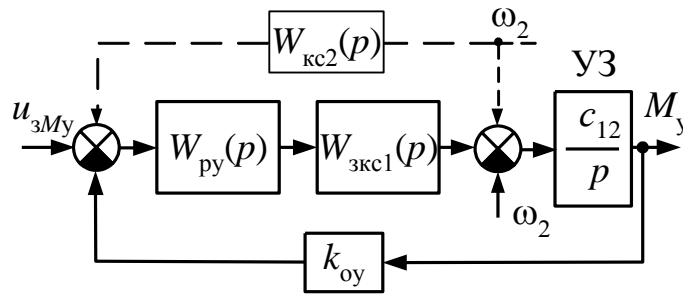


Рисунок 2.11 – Структурная схема контура момента упругого

Передаточная функция разомкнутого контура упругого момента

$$W_{\text{раз.у}}(p) = W_{\text{py}}(p)W_{\text{зксл}}(p)W_{\text{уз}}(p)k_{\text{oy}} = W_{\text{py}}(p)\frac{1/k_{\text{ocl}}}{T_{\mu 3}p + 1}\frac{c_{12}}{p}k_{\text{oy}}. \quad (2.40)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{\text{раз.у}}^{\text{ж}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu 3}p(T_{\mu 3}p + 1)}. \quad (2.41)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{\mu 3}p(T_{\mu 3}p + 1)} = W_{\text{py}}(p)\frac{1/k_{\text{ocl}}}{T_{\mu 3}p + 1}\frac{c_{12}}{p}k_{\text{oy}}. \quad (2.42)$$

Находим передаточную функцию регулятора

$$W_{\text{py}}(p) = \frac{k_{\text{ocl}}}{2T_{\mu 3}c_{12}s}k_{\text{oy}} = k_{\text{py}}, \quad (2.43)$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура момента упругого

$$W_{зку}(p) = \frac{W_{пу}(p)W_{зкл}(p)W_{уз}(p)}{1 + W_{пу}(p)W_{зкл}(p)W_{уз}(p)k_{оу}} = \frac{1/k_{оу}}{2T_{\mu 3}p(T_{\mu 3}p + 1) + 1} \approx \frac{1/k_{оу}}{2T_{\mu 3}p + 1} \quad (2.44)$$

где $k_{оу} = \frac{U_{з\gamma}}{M_{\text{стоп}}}$ – коэффициент обратной связи по моменту упругому;

$U_{з\gamma}$ – напряжение задания по моменту упругому, равное номинальному напряжению управления;

$M_{\text{стоп}}$ – максимальный момент, соответствующий стопорному значению тока якорной цепи.

Обозначим $2T_{\mu 3} = T_{\mu 4}$.

г) Контур скорости рабочего механизма

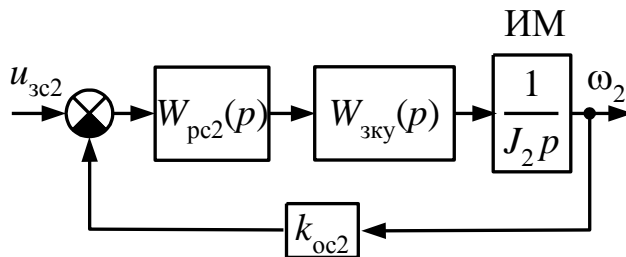


Рисунок 2.12 – Структурная схема контура скорости рабочего механизма

Передаточная функция разомкнутого контура скорости

$$W_{\text{раз.с2}}(p) = W_{\text{pc2}}(p)W_{\text{зку}}(p)W_{\text{им}}(p)k_{\text{oc2}} = W_{\text{pc2}}(p) \frac{1/k_{оу}}{T_{\mu 4}p + 1} \frac{1}{J_2 p} k_{\text{oc2}}. \quad (2.45)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{\text{раз.с2}}^{\text{ж}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu 4}p(T_{\mu 4}p + 1)}. \quad (2.46)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{\mu 4}p(T_{\mu 4}p + 1)} = W_{\text{pc2}}(p) \frac{1}{J_2 p} \frac{1/k_{\text{oy}}}{T_{\mu 4}p + 1} k_{\text{oc2}}. \quad (2.47)$$

Находим передаточную функцию регулятора

$$W_{\text{pc2}}(p) = \frac{k_{\text{oy}}J_2}{2T_{\mu 4}k_{\text{oc2}}} = k_{\text{pc2}}, \quad (2.48)$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура скорости

$$W_{\text{зкс2}}(p) = \frac{W_{\text{pc2}}(p)W_{\text{зкy}}(p)W_{\text{им}}(p)}{1 + W_{\text{pc2}}(p)W_{\text{зкy}}(p)W_{\text{им}}(p)k_{\text{oc2}}} = \frac{1/k_{\text{oc2}}}{2T_{\mu 4}p(T_{\mu 4}p + 1) + 1} \approx \frac{1/k_{\text{oc2}}}{2T_{\mu 4}p + 1} \quad (2.49)$$

Учтем существующую обратную связь по ЭДС двигателя. Внутренний контур объекта регулирования необходимо компенсировать вводом аналогичной обратной связи, но с противоположным знаком. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи при подаче ее на регулятор тока якорной цепи

$$W_{\text{ке}}(p) = \frac{C_{\text{es}}(T_{\mu}p + 1)(T_{\text{r}}p + 1)R_{\text{B}}}{K_{\text{B}}K_{\text{r}}W_{\text{рт}}(p)} \quad (2.50)$$

$$W_{ke}(p) = C_{es} \frac{(T_{\mu}p+1)(T_{\Gamma}p+1)R_B}{K_B K_{\Gamma}} \frac{T_{\mu 2} K_B K_{\Gamma} k_{от} p}{(T_{\Gamma}p+1)(T_a p+1)R_B R_a} = \frac{T_{\mu 2} C_{es} k_{от}}{R_a} \frac{(T_{\mu}p+1)}{(T_a p+1)} p \quad (2.51)$$

Учтем внутреннюю обратную связь по упругому моменту. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи по упругому моменту, заводимая на регулятор скорости

$$W_{ky}(p) = \frac{1}{C_M W_{зкт}(p) W_{pc}(p)} \quad (2.52)$$

$$W_{ky}(p) = \frac{2T_{\mu 2} k_{oc}}{J_{\Sigma}} (2T_{\mu 2}^2 p^2 + 2T_{\mu 2} p + 1) \quad (2.53)$$

Учтем влияние внутренней обратной связи по скорости второй массы. Компенсирующую связь по скорости второй массы заводим на регулятор упругого момента.

$$W_{kc2}(p) = \frac{1}{W_{зкс1}(p) W_{py}(p)} \quad (2.54)$$

Уточненная передаточная функция замкнутого контура скорости двигателя:

$$W_{зкс}(p) = \frac{1/k_{oc}}{2T_{\mu 2} p(T_{\mu 2} p + 1) + 1} \quad (2.55)$$

$$W_{kc2}(p) = \frac{k_{oc}}{k_{py}} 2T_{\mu 2}^2 p^2 + \frac{k_{oc}}{k_{py}} 2T_{\mu 2} p + \frac{k_{oc}}{k_{py}} \quad (2.56)$$

2.3.2 Пятиконтурная система подчиненного регулирования

Структурная схема пятиконтурной системы подчиненного регулирования представлена на рисунке 2.13.

а) Контуры тока возбуждения и тока якорной цепи

Эти контуры аналогичны рассмотренным при синтезе классической трехконтурной системы подчиненного регулирования, поэтому:

– передаточные функции регуляторов имеют вид (2.4) и (2.10):

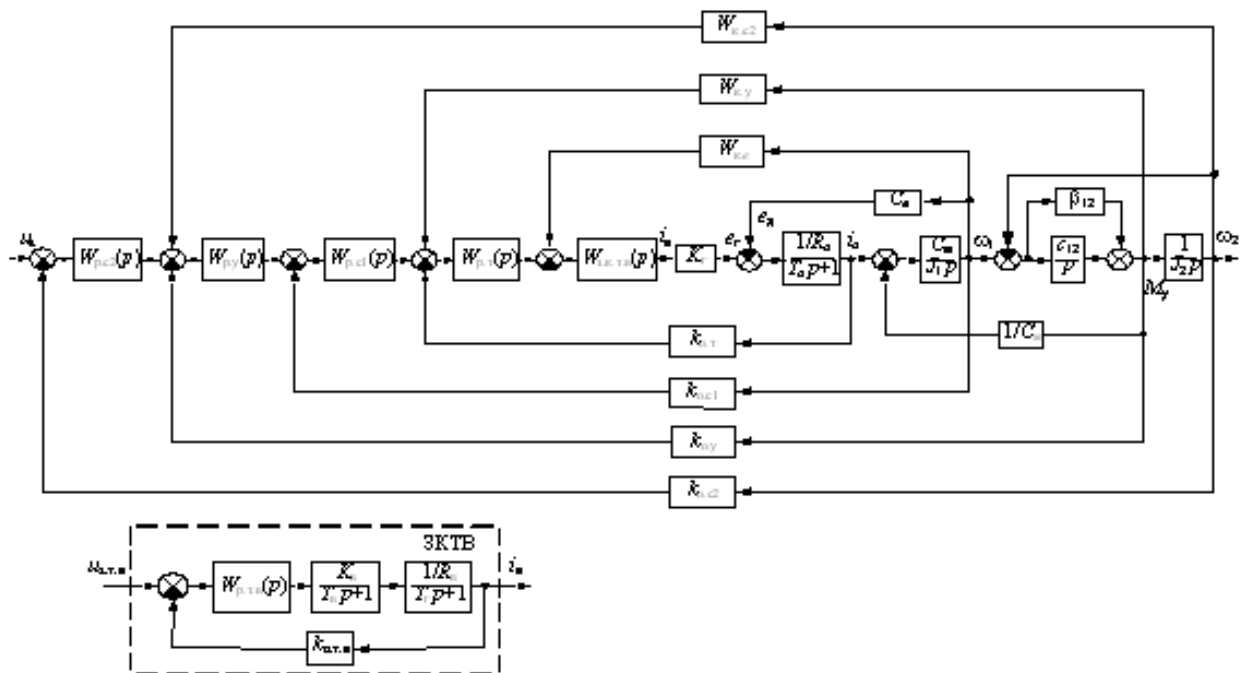


Рисунок 2.13 – Структурная схема пятиконтурной системы подчиненного регулирования

$$W_{p.t.b}(p) = \frac{T_p p + 1}{T_{и1} p},$$

где $T_{и1} = 2T_\mu K_B k_{отв} / R_B$;

$$W_{p.т}(p) = \frac{T_a p + 1}{T_{и2} p},$$

где $T_{и2} = 2T_{\mu 2} K_{\Gamma} k_{от} / R_a k_{отв}$

– передаточные функции замкнутых контуров тока возбуждения и тока якоря имеют вид (2.6) и (2.11):

$$W_{3.к.т.в}(p) \approx \frac{1/k_{от.в}}{2T_{\mu} p + 1}; \quad W_{3.к.т.я}(p) \approx \frac{1/k_{от.т}}{2T_{\mu 2} p + 1}.$$

б) Контур скорости двигателя

Обозначим передаточную функцию регулятора скорости двигателя $W_{p.с1}(p)$.

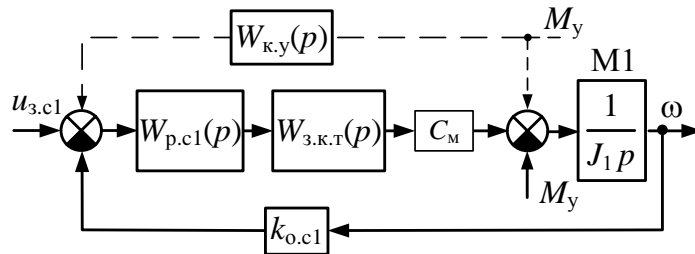


Рисунок 2.14 – Структурная схема контура скорости двигателя

Где $k_{о.с1}$ – коэффициент обратной связи по скорости двигателя;

$$k_{о.с1} = \frac{U_{3.с1}}{\omega_{д.н}},$$

где $U_{3.с1}$ – напряжение задания по скорости двигателя, равное номинальному напряжению управления;

$\omega_{д.н}$ – номинальная угловая скорость двигателя.

Передаточная функция разомкнутого контура скорости:

$$W_{\text{раз.кл}}(p) = W_{\text{р.кл}}(p)W_{\text{з.к.т}}(p)W_{\text{д}}(p)k_{\text{о.кл}}. \quad (2.57)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура:

$$W_{\text{раз.кл}}^{\text{ж}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu 3}p(T_{\mu 3}p + 1)}. \quad (2.58)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура:

$$\frac{1}{2T_{\mu 3}p(T_{\mu 3}p + 1)} = W_{\text{р.кл}}(p) \frac{1/k_{\text{о.т}}}{T_{\mu 3}p + 1} \frac{C_{\text{м}}}{J_1 p} k_{\text{о.кл}}. \quad (2.59)$$

Находим передаточную функцию регулятора:

$$W_{\text{р.кл}}(p) = \frac{k_{\text{о.т}} J_1}{2T_{\mu 3} C_{\text{м}} k_{\text{о.кл}}} = k_{\text{р.кл}}. \quad (2.60)$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура скорости:

$$W_{\text{з.к.кл}}(p) = \frac{W_{\text{р.кл}}(p)W_{\text{з.к.т}}(p)W_{\text{д}}(p)}{1 + W_{\text{р.кл}}(p)W_{\text{з.к.т}}(p)W_{\text{д}}(p)k_{\text{о.кл}}}; \quad (2.61)$$

$$W_{\text{з.к.кл}}(p) = \frac{1/k_{\text{о.кл}}}{2T_{\mu 3}p(T_{\mu 3}p + 1) + 1} \approx \frac{1/k_{\text{о.кл}}}{2T_{\mu 3}p + 1}, \quad (2.62)$$

Обозначим $2T_{\mu 3} = T_{\mu 4}$.

Учтем существующую обратную связь по ЭДС двигателя. Внутренний контур объекта регулирования необходимо компенсировать вводом аналогичной обратной связи, но с противоположным знаком. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи при подаче ее на регулятор тока возбуждения

$$W_{ке}(p) = \frac{C_{es}}{K_{\Gamma} W_{зктв}(p)} \quad (2.63)$$

Уточненная передаточная функция замкнутого контура тока возбуждения:

$$W_{зктв}(p) = \frac{1/k_{отв}}{2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1}$$

$$W_{ке}(p) = \frac{C_{es} k_{отв}}{K_{\Gamma}} (2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1) = \frac{2T_{\mu}^2 k_{отв} C_{es}}{K_{\Gamma}} p^2 + \frac{2T_{\mu} k_{отв} C_{es}}{K_{\Gamma}} p + \frac{k_{отв} C_{es}}{K_{\Gamma}} \quad (2.64)$$

Таким образом, вводится положительная обратная связь по скорости и ее первой и второй производным с соответствующими коэффициентами.

Учтем влияние внутренней обратной связи по упругому моменту. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи на регулятор тока якорной цепи

$$W_{ку}(p) = \frac{1}{C_{ms} W_{зкт}(p)} = 2T_{\mu 2}^2 \frac{k_{от}}{C_{ms}} p^2 + 2T_{\mu 2} \frac{k_{от}}{C_{ms}} p + \frac{k_{от}}{C_{ms}} \quad (2.65)$$

Таким образом, чтобы скомпенсировать влияние внутренней обратной связи по упругому моменту, необходимо ввести на регулятор тока якорной цепи сигналы положительных обратных связей по упругому моменту, его первой и второй производным с соответствующими коэффициентами.

в) Контур упругого момента

Обозначим передаточную функцию регулятора момента упругого $W_{p,y}(p)$.

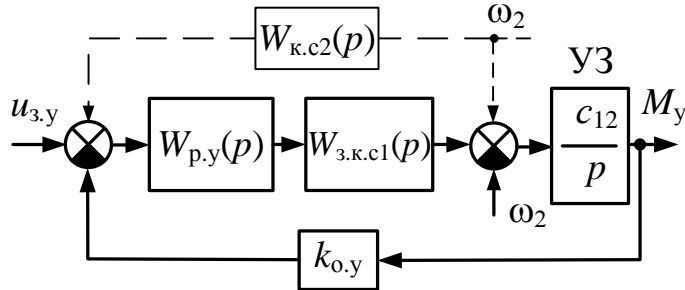


Рисунок 2.15 – Структурная схема контура момента упругого

где $k_{o,y}$ – коэффициент обратной связи по моменту упругому,

$$k_{o,y} = \frac{U_{3,y}}{M_{\text{стоп}}},$$

где $U_{3,y}$ – напряжение задания по моменту упругому, равное номинальному напряжению управления;

$M_{\text{стоп}}$ – максимальный момент, соответствующий стопорному значению тока якорной цепи.

Пренебрегаем внутренней обратной связью по скорости второй массы, которую учтем в дальнейшем.

Передаточная функция разомкнутого контура упругого момента:

$$W_{\text{раз},y}(p) = W_{p,y}(p)W_{3,к.с1}(p)W_{y,3}(p)k_{o,y}. \quad (2.66)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура:

$$W_{\text{раз},y}^{\text{ж}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu 4}p(T_{\mu 4}p + 1)}. \quad (2.67)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура:

$$\frac{1}{2T_{\mu 4}p(T_{\mu 4}p + 1)} = W_{p.y}(p) \frac{1/k_{o.cl}}{T_{\mu 4}p + 1} \frac{c_{12}}{p} k_{o.y}. \quad (2.68)$$

Находим передаточную функцию регулятора:

$$W_{p.y}(p) = \frac{k_{o.cl}}{2T_{\mu 4}c_{12}k_{o.y}} = k_{p.y}, \quad (2.69)$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура момента упругого:

$$W_{з.к.у}(p) = \frac{W_{p.y}(p)W_{з.к.с1}(p)W_{y.3}(p)}{1 + W_{p.y}(p)W_{з.к.с1}(p)W_{y.3}(p)k_{o.y}}; \quad (2.70)$$

$$W_{з.к.у}(p) = \frac{1/k_{o.y}}{2T_{\mu 4}p(T_{\mu 4}p + 1) + 1} \approx \frac{1/k_{o.y}}{2T_{\mu 4}p + 1}, \quad (2.71)$$

Обозначим $2T_{\mu 4} = T_{\mu 5}$.

г) Контур скорости рабочего механизма

Обозначим передаточную функцию регулятора скорости рабочего механизма $W_{p.c2}(p)$.

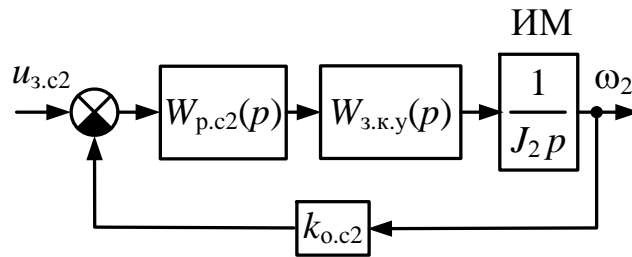


Рисунок 2.16 – Структурная схема контура скорости рабочего механизма

Где $k_{o.c2}$ – коэффициент обратной связи по скорости рабочего механизма,

$$k_{o.c2} = \frac{U_{3.c2}}{\omega_{д.н}},$$

где $U_{3.c2}$ – напряжение задания по скорости рабочего механизма, равное номинальному напряжению управления;

$\omega_{д.н}$ – номинальная угловая скорость двигателя.

Передаточная функция разомкнутого контура скорости рабочего механизма:

$$W_{раз.c2}(p) = W_{p.c2}(p) \frac{1/k_{o.y}}{T_{\mu 5} p + 1} \frac{1}{J_2 p} k_{o.c2}. \quad (2.72)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура:

$$W_{раз.c2}^ж(p) = \frac{1}{2T_{\mu 5} p (T_{\mu 5} p + 1)}. \quad (2.73)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура:

$$\frac{1}{2T_{\mu 5}p(T_{\mu 5}p + 1)} = W_{p.c2}(p) \frac{1/k_{o.y}}{T_{\mu 5}p + 1} \frac{1}{J_2 p} k_{o.c2}. \quad (2.74)$$

Находим передаточную функцию регулятора скорости рабочего механизма:

$$W_{p.c2}(p) = \frac{k_{o.y}J_2}{2T_{\mu 5}k_{o.c2}} = k_{p.c2}, \quad (2.75)$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура скорости рабочего механизма:

$$W_{з.к.c2}(p) = \frac{W_{p.c2}(p)W_{з.к.y}(p)W_{и.м}(p)}{1 + W_{p.c2}(p)W_{з.к.y}(p)W_{и.м}(p)k_{o.c2}}; \quad (2.76)$$

$$W_{з.к.c2}(p) = \frac{1/k_{o.c2}}{2T_{\mu 5}p(T_{\mu 5}p + 1) + 1} \approx \frac{1/k_{o.c2}}{2T_{\mu 5}p + 1}, \quad (2.77)$$

Учтем влияние внутренней обратной связи по скорости второй массы. Компенсирующую связь скорости второй массы заводим на регулятор упругого момента.

$$W_{к.c2}(p) = \frac{1}{W_{з.к.c1}(p)W_{p.y}(p)}. \quad (2.78)$$

Уточненная передаточная функция замкнутого контура скорости двигателя:

$$W_{\text{з.к.с1}}(p)' = \frac{1/k_{\text{o.с1}}}{2T_{\mu3}p(T_{\mu3}p + 1) + 1}. \quad (2.79)$$

$$W_{\text{к.с2}}(p) = \frac{k_{\text{o.с}}}{k_{\text{р.у}}} 2T_{\mu3}^2 p^2 + \frac{k_{\text{o.с}}}{k_{\text{р.у}}} 2T_{\mu3} p + \frac{k_{\text{o.с}}}{k_{\text{р.у}}}. \quad (2.80)$$

Таким образом, чтобы компенсировать влияние внутренней обратной связи по скорости второй массы, необходимо ввести на регулятор момента упругого сигналы положительных обратных связей по скорости второй массы, ее первой и второй производным с соответствующими коэффициентами.

На рисунках 3.3 – 3.4 представлены графики, показывающие влияние коэффициента форсировки на переходные процессы.

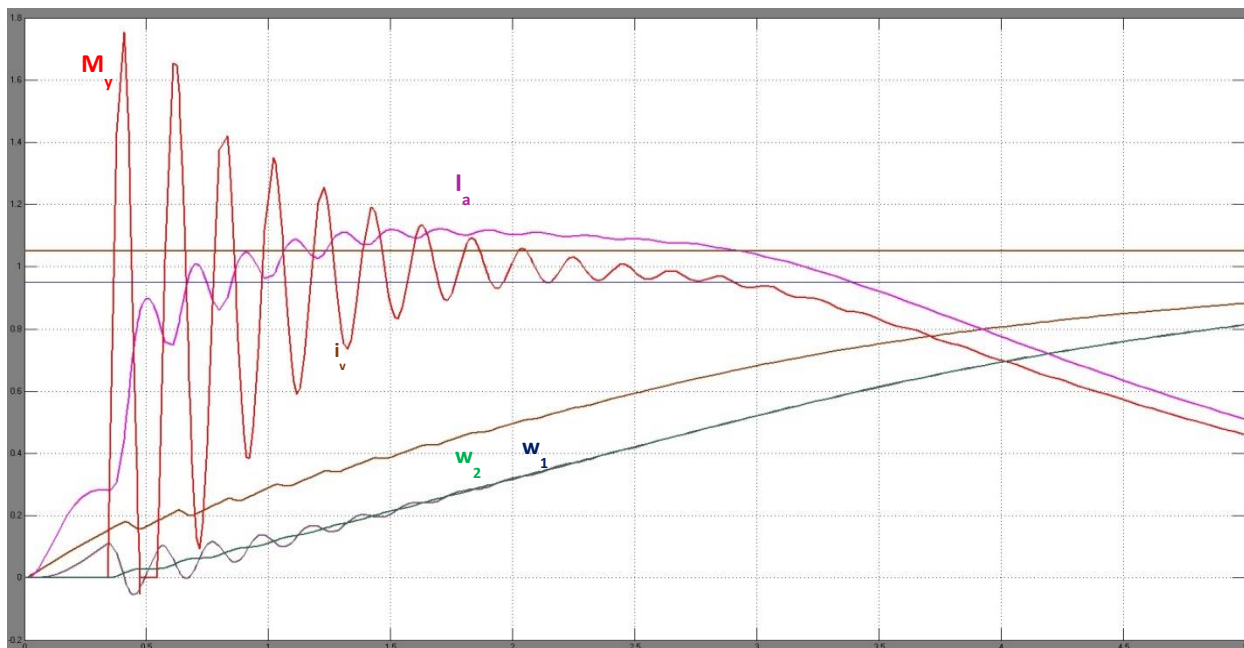


Рисунок 3.3 - Характеристика переходного процесса двухконтурной СР при $K_f=1$

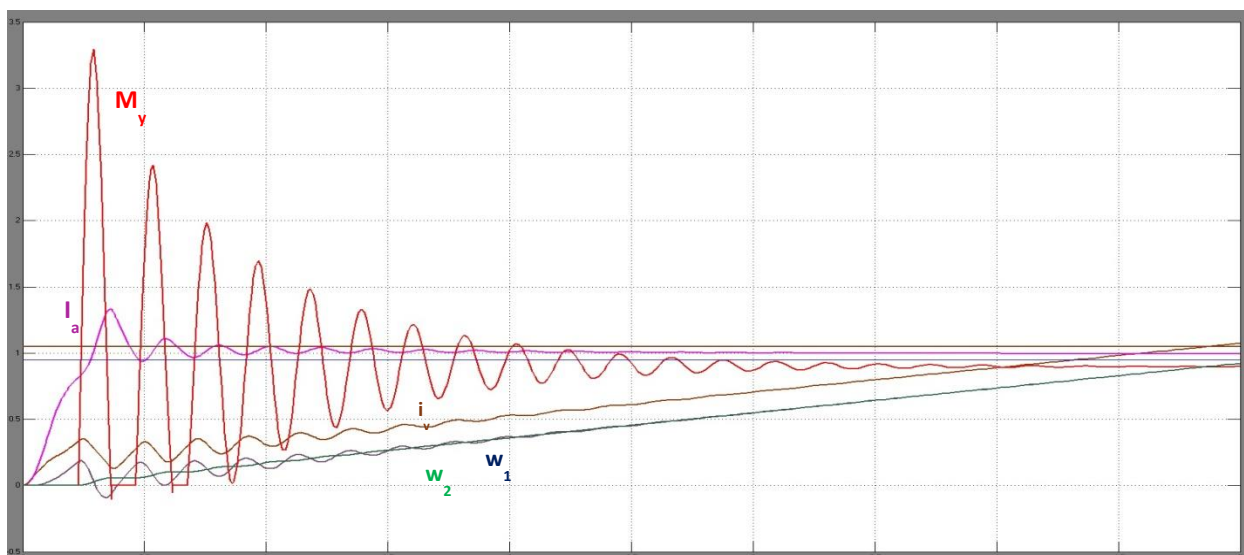


Рисунок 3.4 - Характеристика переходного процесса двухконтурной СР при $K_f=4$

Сравнив полученные результаты, можно увидеть, что с увеличением коэффициента форсировки увеличивается и бросок упругого момента.

Таблица 3.1 – значение момента упругого (M_y) и времени переходного процесса (t) при изменении K_f

K_f	M_y (max) о.е	t
1	1.4	7,7
2	1.7	6.4
3	2.1	5.7
4	2.2	5.2
5	3.3	5.2
6	3.3	5.2
7	3.3	5.2
8	3.3	5.2
9	3.3	5.2
10	3.3	5.2

3.2 Электропривод с трехконтурной системой подчиненного регулирования

В электроприводе поворота, в большей части определяющем производительность экскаватора, наибольшее значение имеют пуско - тормозные режимы, так как большое влияние на динамические нагрузки оказывает зазор в передачах (внутреннее возмущающее воздействие), величина которого достигает 1-2 радиана в зависимости от износа. Зазоры при этом могут быть разными в каждом редукторе. При выборе зазоров возникают колебания упругих моментов, превышающие в 2-3 раза допустимые, что приводит к разрушению венцовой шестерни, которая составляет примерно 30 % стоимости всего экскаватора. Наиболее распространенным на экскаваторах в настоящее время является электропривод с вращающимся преобразователем по системе тиристорный возбудитель - генератор-двигатель (ТВ-Г-Д).

Главной задачей электропривода является высокое быстродействие при наибольшем ограничении динамических нагрузок в механической части электропривода. Этим требованиям отвечают системы подчиненного регулирования (СПР) координат электропривода.

На основании структурной схемы электропривода (рисунок 2.5) составлена схема модели трехконтурной СПР с эквивалентным двигателем:

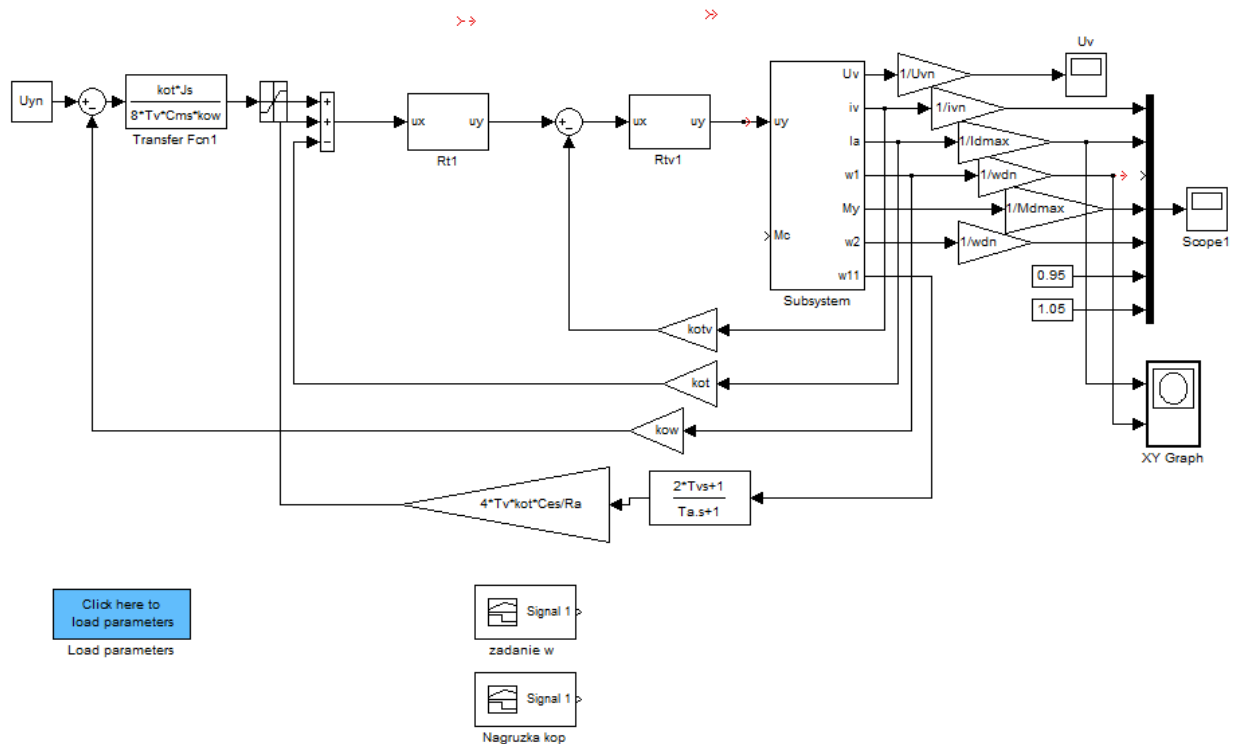


Рисунок 3.5 – Схема модели электропривода с трехконтурной СПР

Объект управления имеет вид:

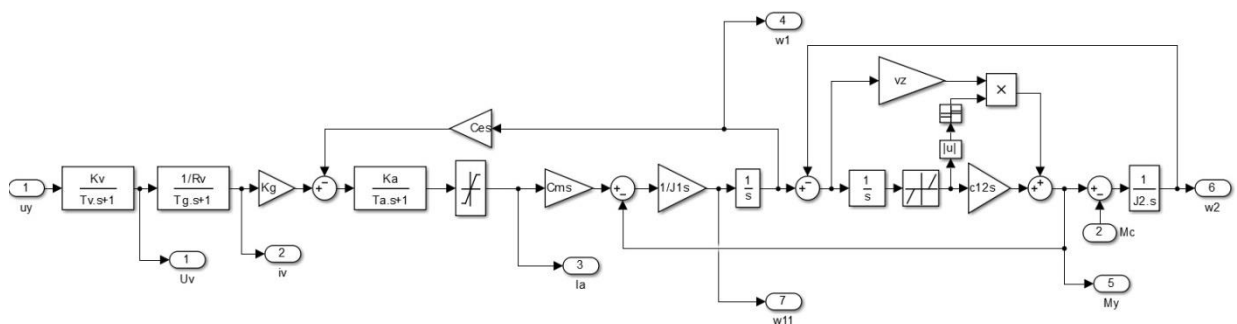


Рисунок 3.6 – Объект управления СПР с эквивалентным двигателем

На рисунках 3.7 – 3.8 представлено влияние коэффициента форсировки на графики переходного процесса.



Рисунок 3.7 - Характеристика переходного процесса трехконтурной СПР при $K_f=1$

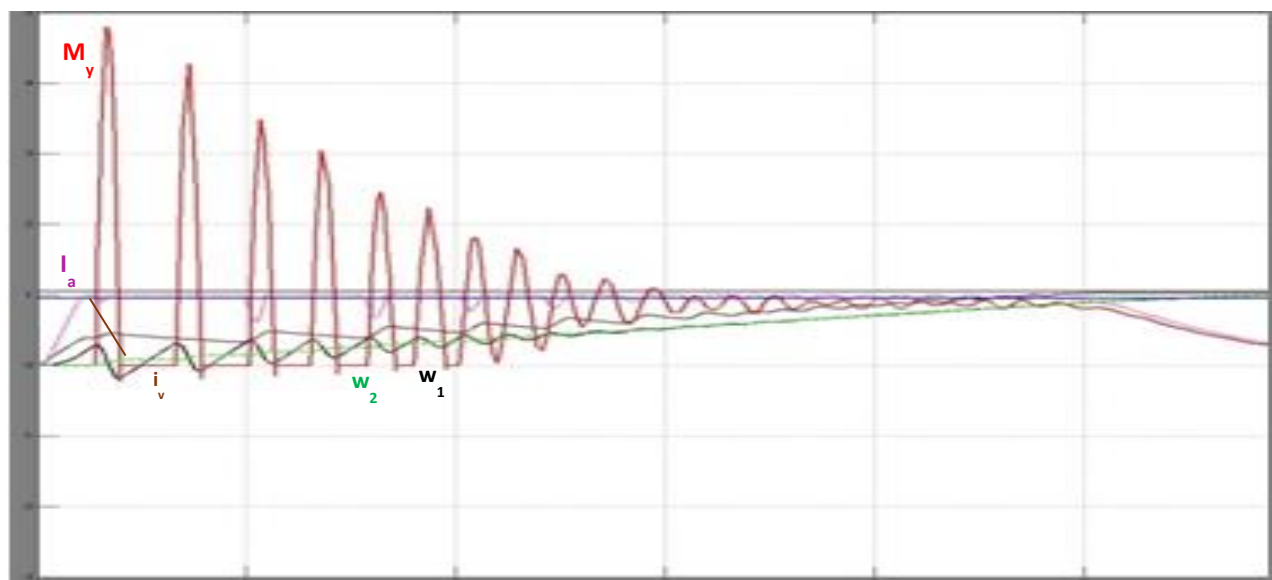


Рисунок 3.8 - Характеристика переходного процесса трехконтурной СПР при $K_f=4$

При сравнении полученных результатов мы видим, что с увеличением коэффициента форсировки увеличивается и бросок упругого момента.

Таблица 4.1 – значение момента упругого(M_y) и времени переходного процесса (t) при изменении K_f

Kf	My (max) o.e	t
1	2,4	8
2	3,5	6.5
3	4,4	6.3
4	4,7	6.3
5	5,0	6.2
6	5,0	6.2
7	5,0	6.2
8	5,1	6.2
9	5,1	6.2
10	5,1	6.2

Модель трехконтурной СПР с двумя двигателями:

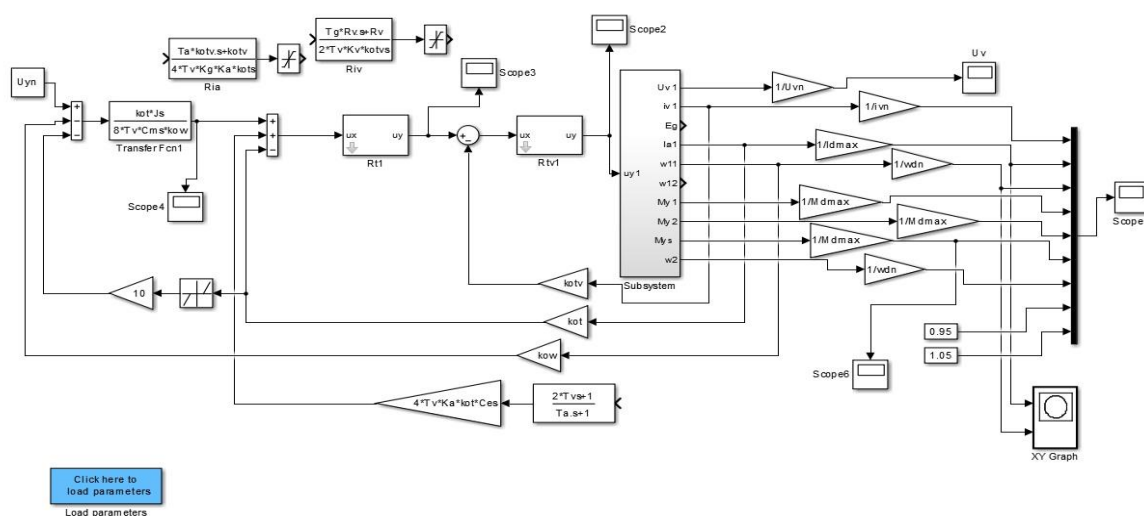


Рисунок 3.9 – Схема модели с трехконтурной СПР с двумя двигателями

Объект управления имеет вид:

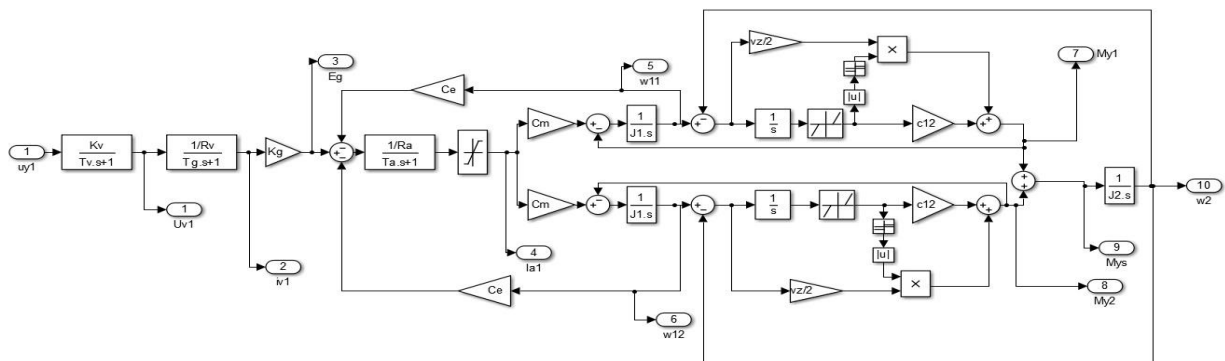


Рисунок 3.10 – объект управления трехконтурной СПР с двумя двигателям

В системе с двумя двигателями графики переходного процесса выглядят следующим образом:

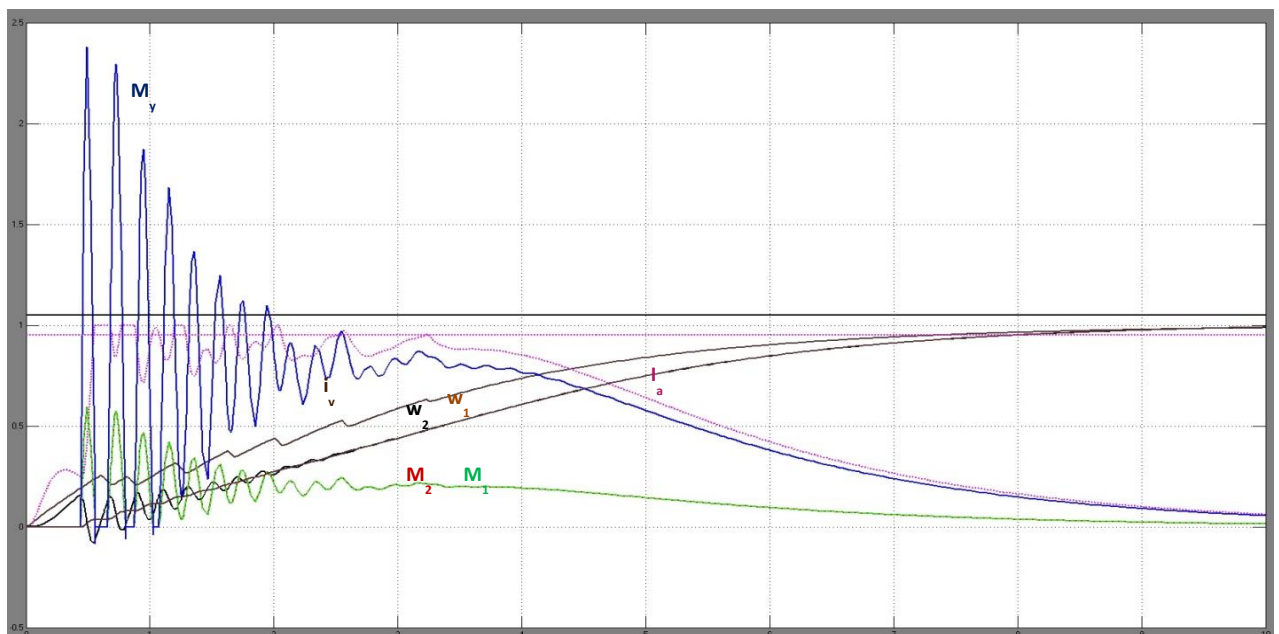


Рисунок 3.11 - Характеристика переходного процесса трехконтурной СПР с двумя двигателями при величине зазоров $d1=2$ рад и $d2=2$ рад

Как видно из графиков, полученных при моделировании трёхмассовой ЭМС, броски моментов в относительных единицах превышают допустимые значения, чего невозможно наблюдать при моделировании двухмассовой ЭМС привода поворота экскаватора.

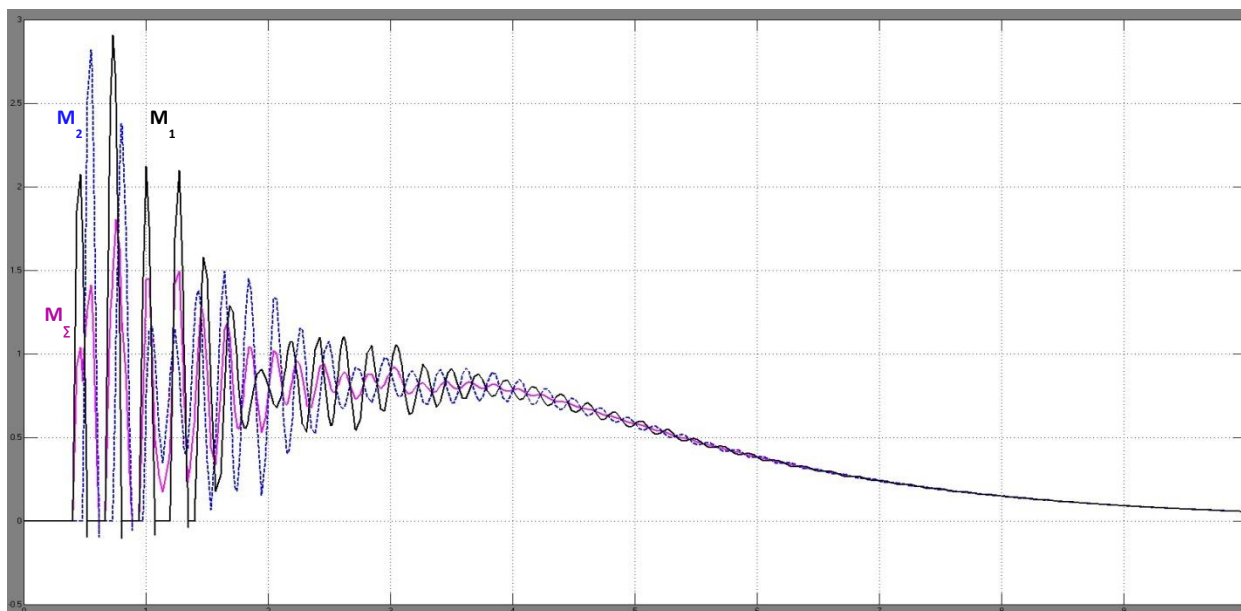


Рисунок 3.12 – Графики моментов при величине зазоров величине зазоров $d_1=2$ рад $d_2=1.5$ рад

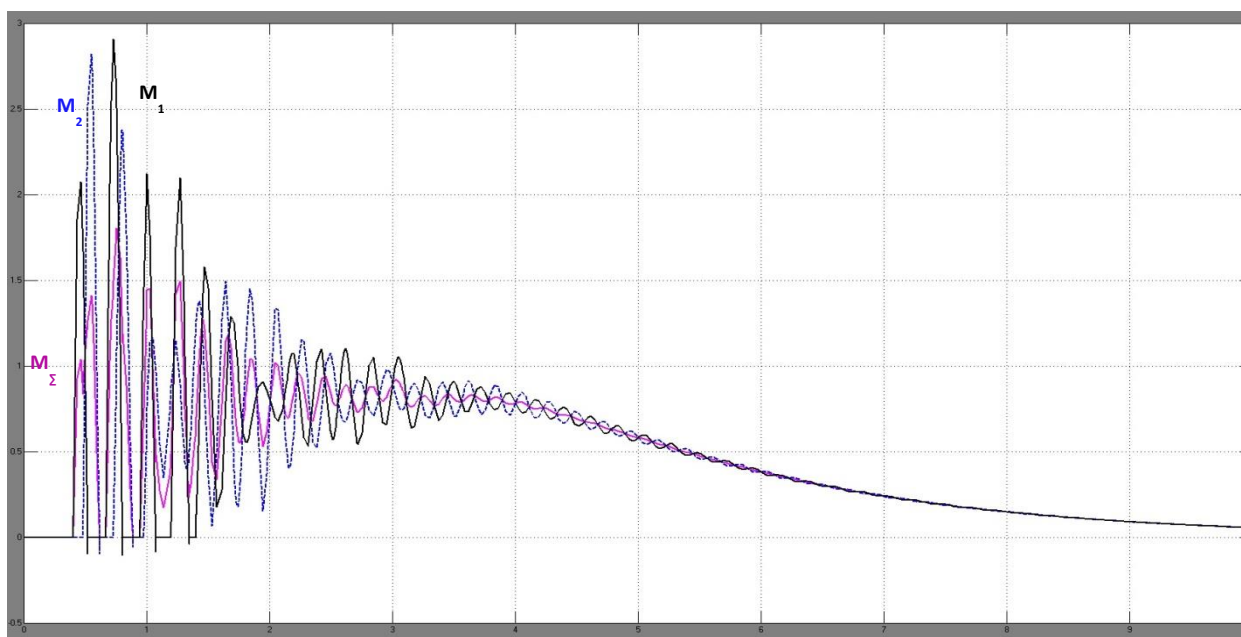


Рисунок 3.13 – Графики моментов при величине зазоров величине зазоров $d_1=2.5$ рад $d_2=1.5$ рад

На данных моделях хорошо видны причины возникновения поломок и аварий в электроприводе поворота экскаватора, стачивание зубцов шестерни и выход её из строя вследствие превышения допустимых нагрузок при бросках момента упругого.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе работы были предложены различные варианты синтеза систем управления двухдвигательного электропривода поворота экскаватора, которые позволяют в зависимости от имеющейся информации о координатах объекта управления увеличить быстродействие и снизить динамические нагрузки электропривода. Увеличение быстродействия происходит за счет уменьшения времени переходных процессов, а ограничение динамических нагрузок – за счет снижения бросков упругих моментов. Это положительно сказывается в конечном итоге на эксплуатационной производительности экскаватора и улучшении технологического процесса экскавации.

В дипломной работе были представлены системы с последовательной коррекцией координат, для двухдвигательного электропривода поворота экскаватора. Были рассмотрены двух-, трёх-, четырёх- и пятиконтурные системы подчинённого регулирования. Для трёхконтурной системы подчинённого регулирования двухдвигательным электроприводом поворота экскаватора была составлена трёхмассовая модель для исследования процессов происходящих в электроприводе и анализе поломок и неисправностей. При работе не ставился вопрос противопоставить эти системы и выявить наилучшую, поэтому все виды имеют право на существование, можно рекомендовать выбор конкретной системы управления, исходя из возможности получить информацию о координатах объекта управления. На моделях, полученных в дипломной работе хорошо видны причины возникновения поломок и аварий в электроприводе поворота экскаватора, стачивание зубцов шестерни и выход её из строя в следствии превышения допустимых нагрузок при бросках момента упругого.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеев, В.В. Электрические машины. Моделирование электрических машин электроприводов горного оборудования [текст]: учеб. пособие / В.В. Алексеев, А.Е. Козярук, Э.А. Загивный. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), 2006. – 58 с.
2. Андриевский, Б.Р. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB [текст] / Б.Р. Андриевский, А.Л. Фрадков. – СПб.: Наука, 2000. – 475 с.
3. Афанасьев, В.Н. Математическая теория конструирования систем автоматического управления [текст]: учебник для вузов / В.Н. Афанасьев, В.Б. Колмановский, В.Р. Носов. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2003. – 614 с.: ил.
4. Башарин, А.В. Управление электроприводами [текст]: учеб. пособие для вузов / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392с., ил.
5. Беллман, Р. Динамическое программирование [текст] / Р. Беллман. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960.
6. Бушев, А.В. Позиционный электропривод с переменной структурой в канале управления [текст]: дис. канд. техн. наук: 05.09.03 / Бушев Александр Валериевич. – Тольятти, 2008. – 147 с. – Библиогр.: 115–121 с.
7. Бушев, А.В. Система управления электроприводом с переменной структурой [текст] / А.В. Бушев, В.А. Бушев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2006. – С. 65–70.
8. Валиев, Р.М. Методика синтеза систем управления экскаваторными электроприводами [текст] / Р.М. Валиев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – №4 – С. 198–206.
9. Валиев, Р.М. Разработка структур систем управления электроприводами главных механизмов однокровшовых экскаваторов-мехлопат

[текст]: дис. канд. техн. наук: 05.09.03 / Валиев Рустам Мансурович. – М., 2007. – 150 с. – Библиогр.: 131–140 с.

10. Волков, Д.П. Динамика и прочность одноковшовых экскаваторов [текст] / Д.П. Волков, – М.: Машиностроение, 1965. – 464 с.

11. Волков, Д.П. Динамика электромеханических систем экскаваторов [текст] / Д.П. Волков, Д.А. Каминская. – М.: Машиностроение, 1971. – 384 с.

12. Востриков, А.С. Теория автоматического регулирования [текст]: учеб. пособие / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 364 с.

13. Вуль, Ю.Я. Наладка электроприводов экскаваторов [текст] / Ю.Я. Вуль, В.И. Ключев, Л.В. Седаков. 2-е изд., перераб. и доп. – М: Недра, 1975. – 312 с.

14. Ключев, В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода [текст] / В.И. Ключев. – М.: Энергия, 1971. – 320с.

15. Ключев, В.И. Теория электропривода [текст]: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с., ил.

16. Ключев, В.И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов [текст]: учебник для вузов / В.И. Ключев, В.М. Терехов. – М.: Энергия, 1980. – 360 с., ил.

17. Кочетков, В.П. К вопросу о математической модели электромеханической системы [текст] / В.П. Кочетков, П.Э. Подборский // Сб. трудов XVII Межд. науч. конф. – Кострома: Изд-во Костромского гос. технол. ун-та, 2004. – С. 173–175.

18. Кочетков, В.П. К вопросу о физико-математическом моделировании динамики экскаваторного электропривода [текст] / В.П. Кочетков, А.А. Колесников, А.В. Коловский // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отрас-

лях: тр. 3-ей всероссийской научн.-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – С. 76–81.

19. Кочетков, В.П. Компьютерное моделирование электропривода с учетом жесткости и зазора в механической части [текст] / В.П. Кочетков, П.Э. Подборский // Сб. трудов 5-й Межд. науч.-тех. конф. Ч. 1. – СПб: «Нестор», 2004. – С. 230–234.

20. Кочетков, В.П. Оптимизация систем автоматического управления экскаваторного электропривода [текст] / В.П. Кочетков, А.В. Коловский, Н.С. Дьяченко, И.С. Рублевский // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: тр. VI всероссийской научн.-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2007. – С. 223–227.

21. Кочетков, В.П. Оптимизация управления технологическим процессом открытой добычи полезных ископаемых карьерными экскаваторами [текст]: дис. докт. техн. наук: 05.13.07 / Кочетков Владимир Петрович. – Красноярск, 1996. – 469 с. – Библиогр.: 390–422.

22. Кочетков, В.П. Основы теории управления [текст]: учеб. пособие. / В.П. Кочетков. – 2-е изд., испр. – Абакан: ХГУ им. Н.Ф. Катанова, 2007. – 260 с.

23. Кочетков, В.П. Основы электропривода [текст]: учеб. пособие. / В.П. Кочетков. – 2-е изд., испр. – Абакан: Сиб. федер. ун-т; ХТИ – Филиал СФУ, 2007. – 272 с.

24. Кочетков, В.П. Совершенствование экскаваторного электропривода [Текст] / В.П. Кочетков, А.В. Коловский // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-17-2011): доклады 17-й Междунар. научн.-практ. конф. – Томск: САН ВШ; В-Спектр, 2011. – С. 84–88.

25. Кочетков, В.П. Теория автоматизированного электропривода [текст]: учеб. пособие / В.П. Кочетков, Г.А. Багаутинов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 1992. – 328 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Технические характеристики экскаватора ЭКГ-8И

Каталожные данные экскаватора приведены в таблица А.
Таблица А - технические характеристики экскаватора ЭКГ-8И

[illegible]

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Осциллограммы переходных процессов электромеханической системы с двухконтурной системой подчиненного регулирования

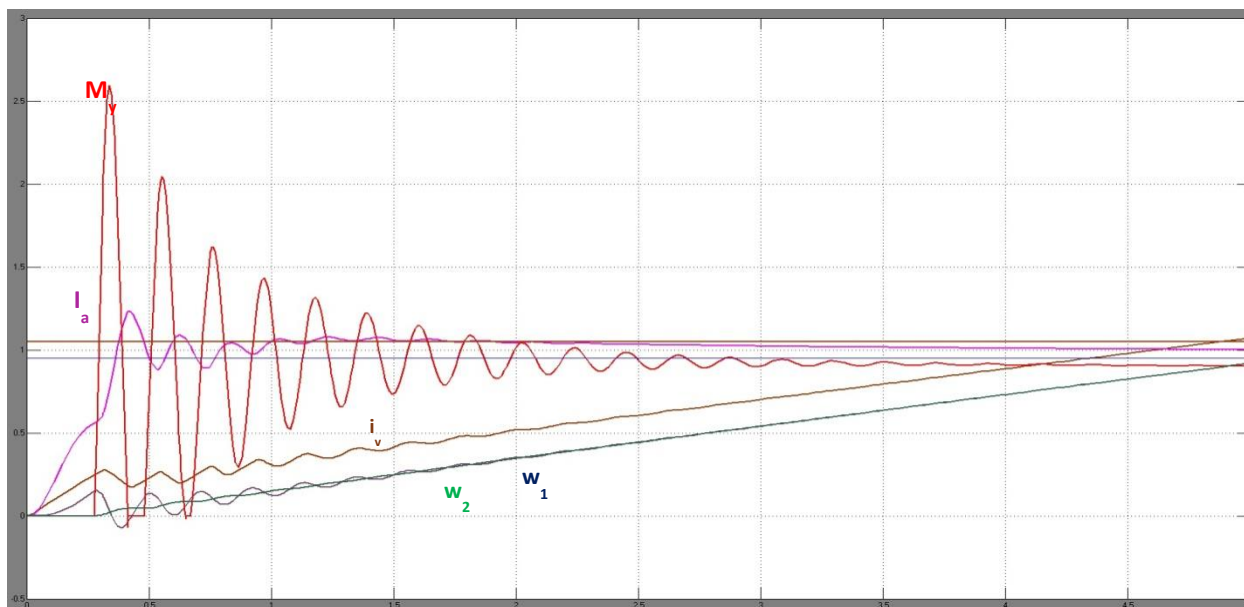


Рисунок Б.1 - Характеристика переходного процесса двухконтурной СПР при $K_f=2$

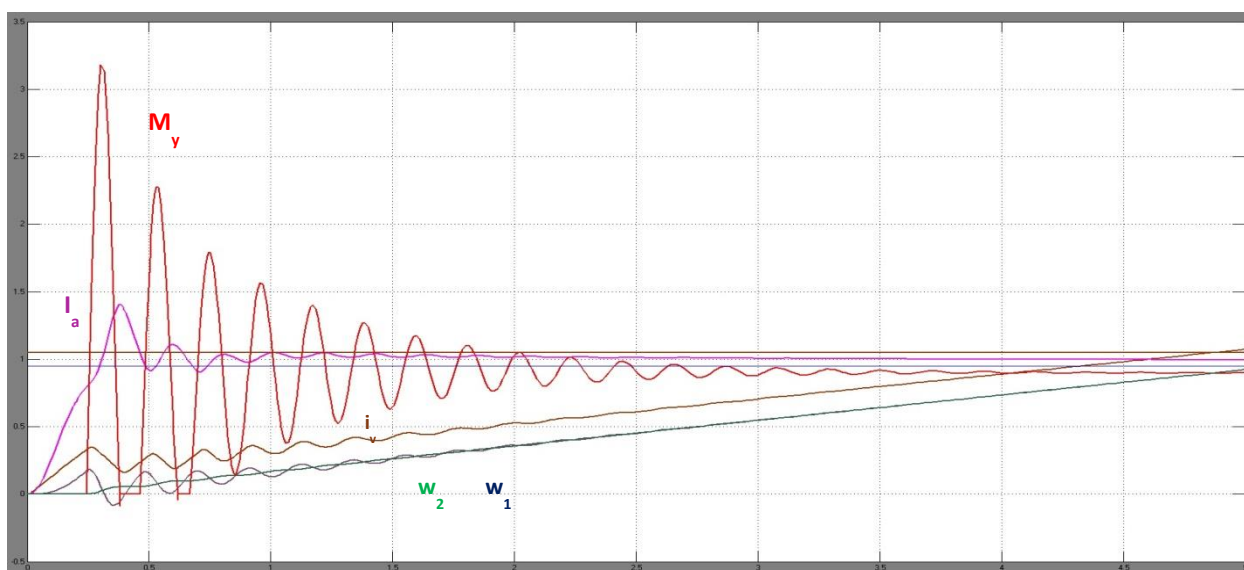


Рисунок Б.2 - Характеристика переходного процесса двухконтурной СПР при $K_f=3$

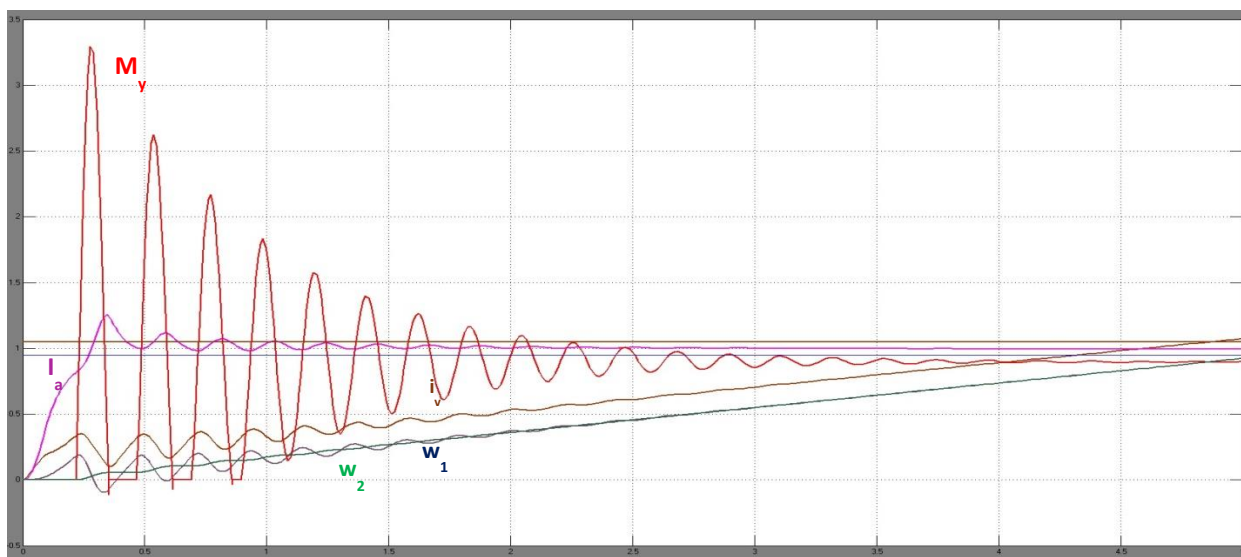


Рисунок Б.3 - Характеристика переходного процесса двухконтурной СПР при $K_f=5$

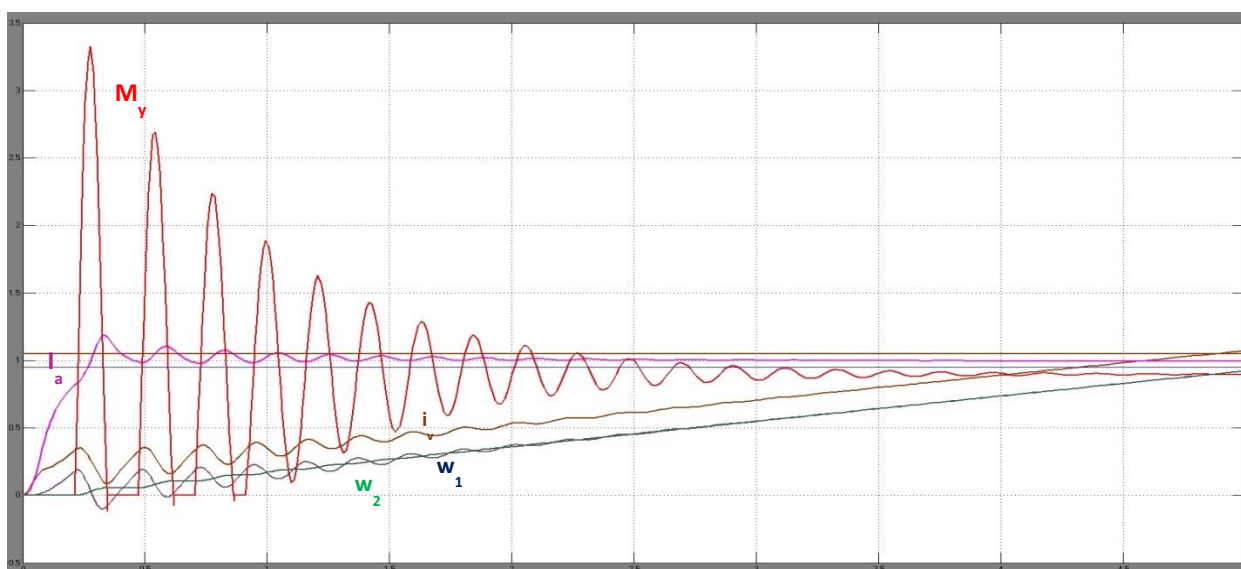


Рисунок Б.4 - Характеристика переходного процесса двухконтурной СПР при $K_f=6$

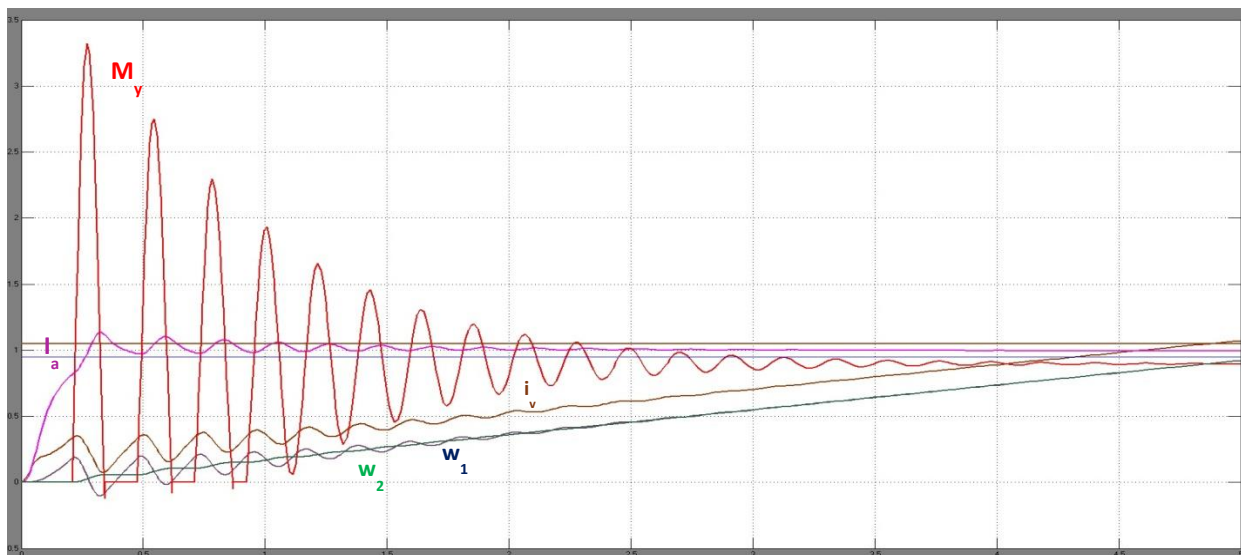


Рисунок Б.5 - Характеристика переходного процесса двухконтурной СПР при $K_f=7$

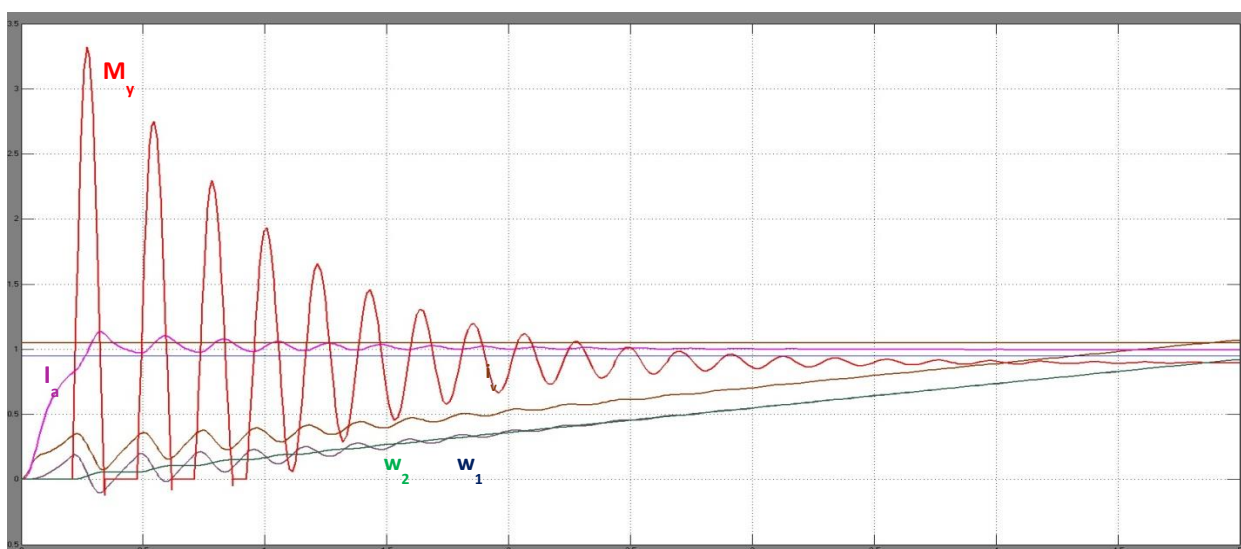


Рисунок Б.6 - Характеристика переходного процесса двухконтурной СПР при $K_f=8$

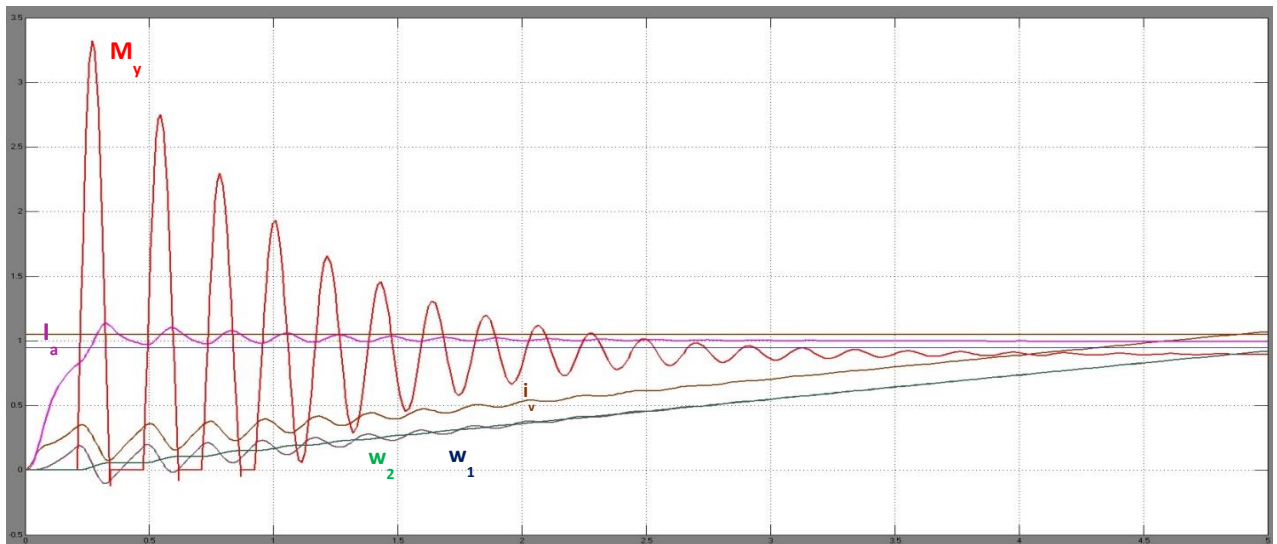


Рисунок Б.7 - Характеристика переходного процесса двухконтурной СПР при $K_f=9$

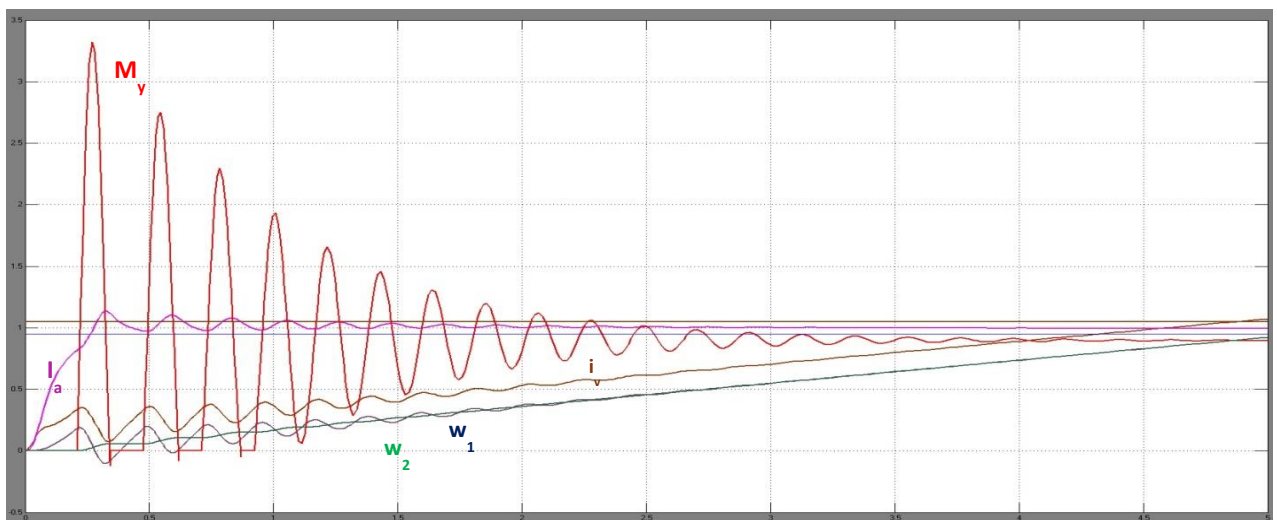


Рисунок Б.8 - Характеристика переходного процесса двухконтурной СПР при $K_f=10$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Осциллограммы переходных процессов электромеханической системы с трехконтурной системой подчиненного регулирования

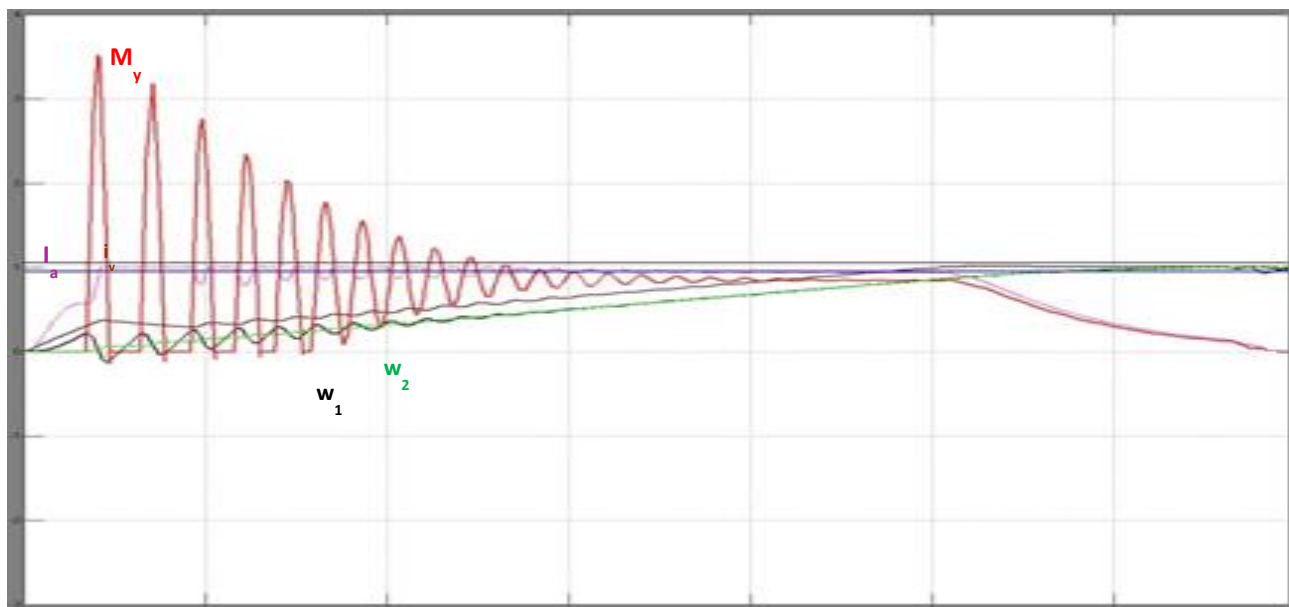


Рисунок В.1 - Характеристика переходного процесса трехконтурной СПР при $K_f=2$

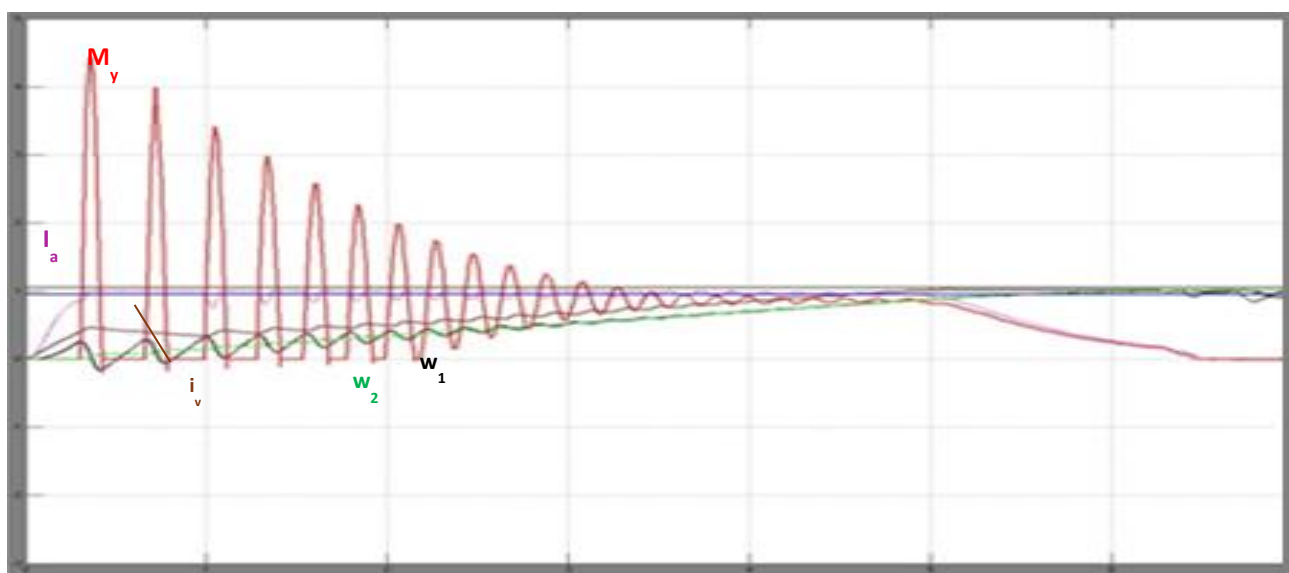


Рисунок В.2 - Характеристика переходного процесса трехконтурной СПР при $K_f=3$

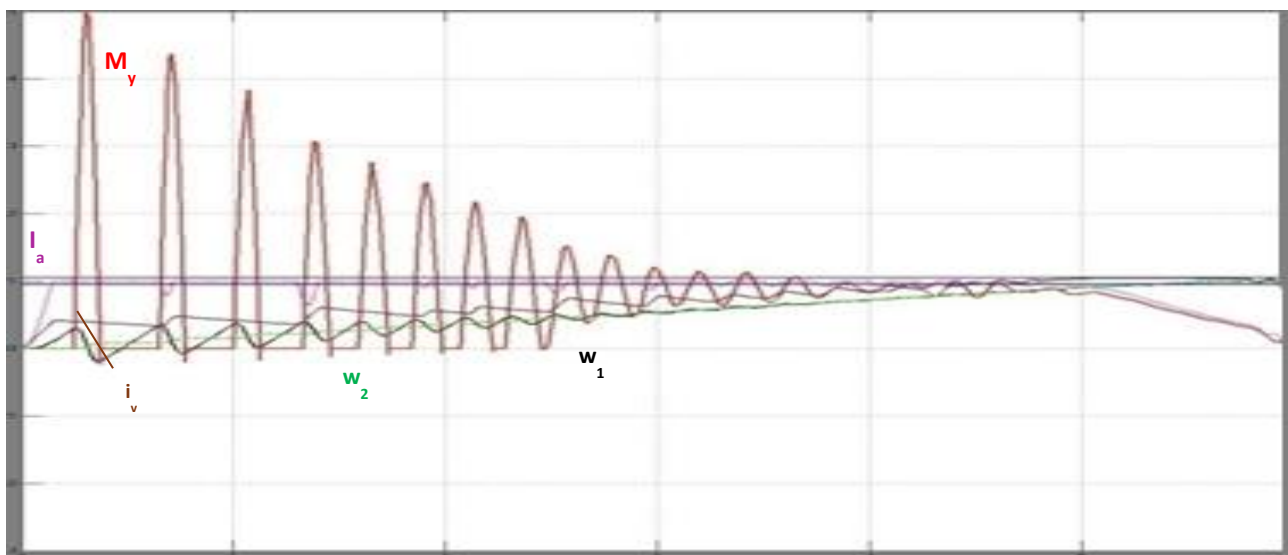


Рисунок В.3 - Характеристика переходного процесса трехконтурной СПР при $K_f=5$

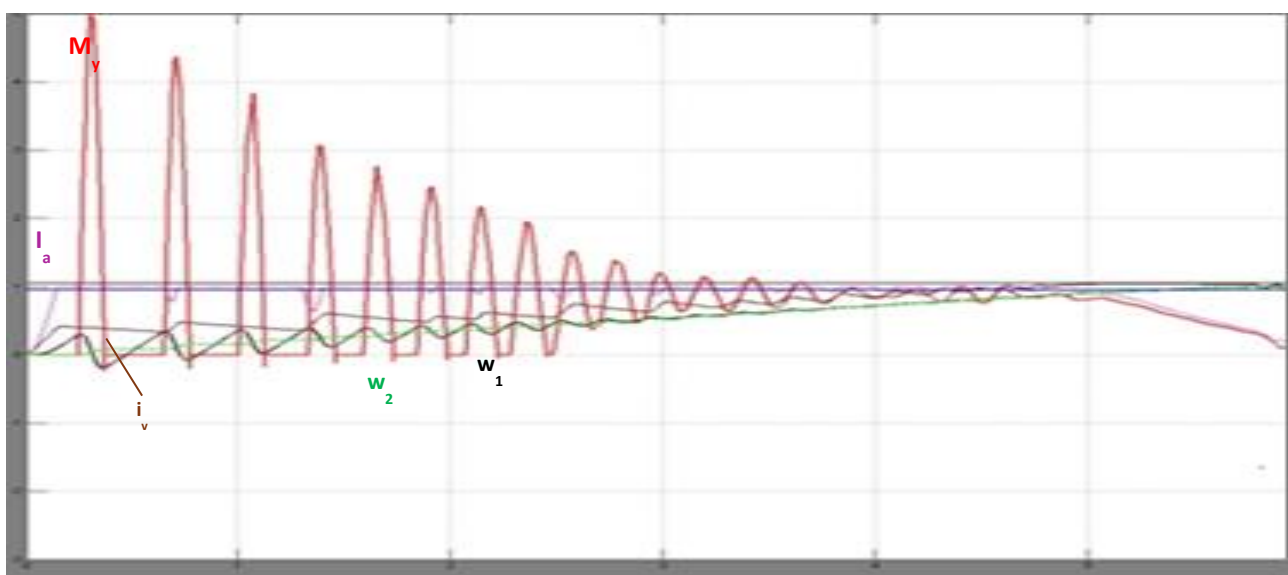


Рисунок В.4 - Характеристика переходного процесса трехконтурной СПР при $K_f=6$

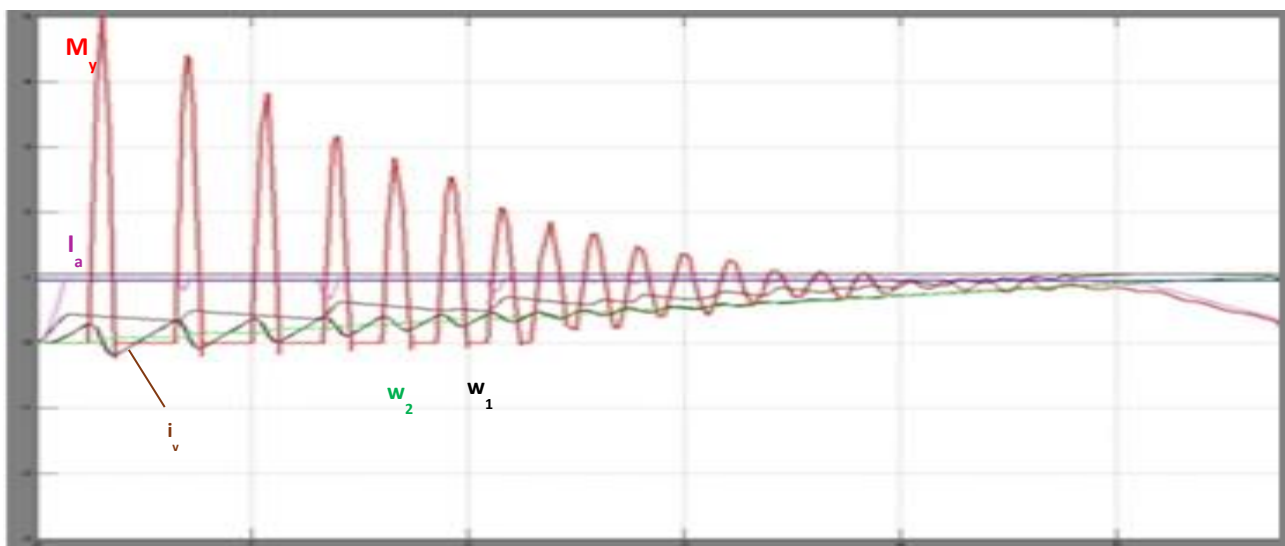


Рисунок В.5 - Характеристика переходного процесса трехконтурной СПР при $K_f=7$

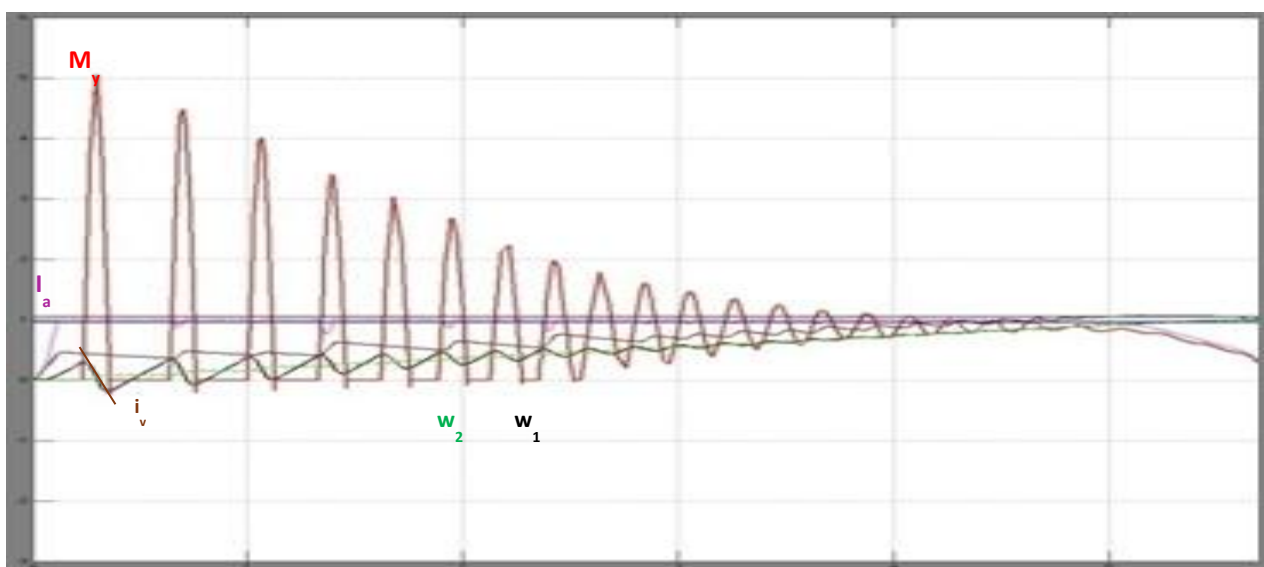


Рисунок В.6 - Характеристика переходного процесса трехконтурной СПР при $K_f=8$

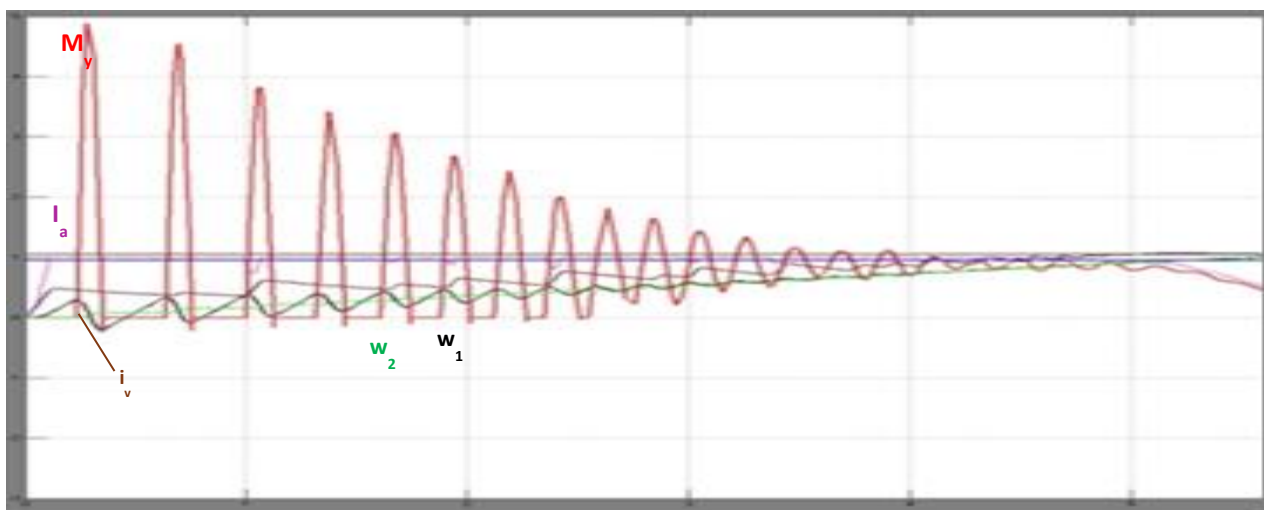


Рисунок В.7 - Характеристика переходного процесса трехконтурной СПР при $K_f=9$

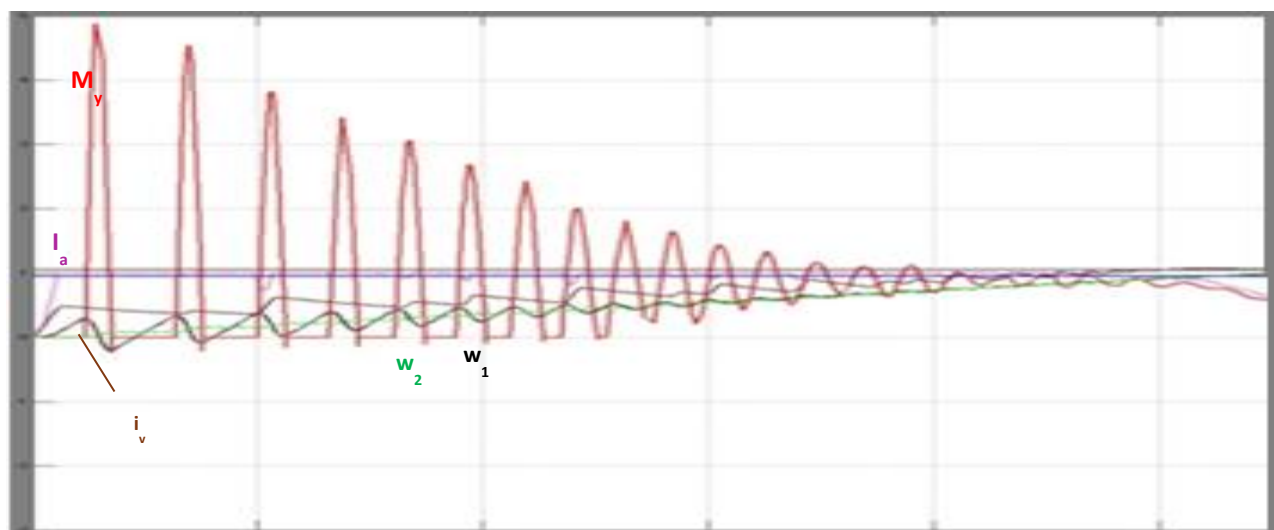


Рисунок В.8- Характеристика переходного процесса трехконтурной СПР при $K_f=10$

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Осциллограммы переходных процессов электромеханической системы с четырехконтурной системой подчиненного регулирования

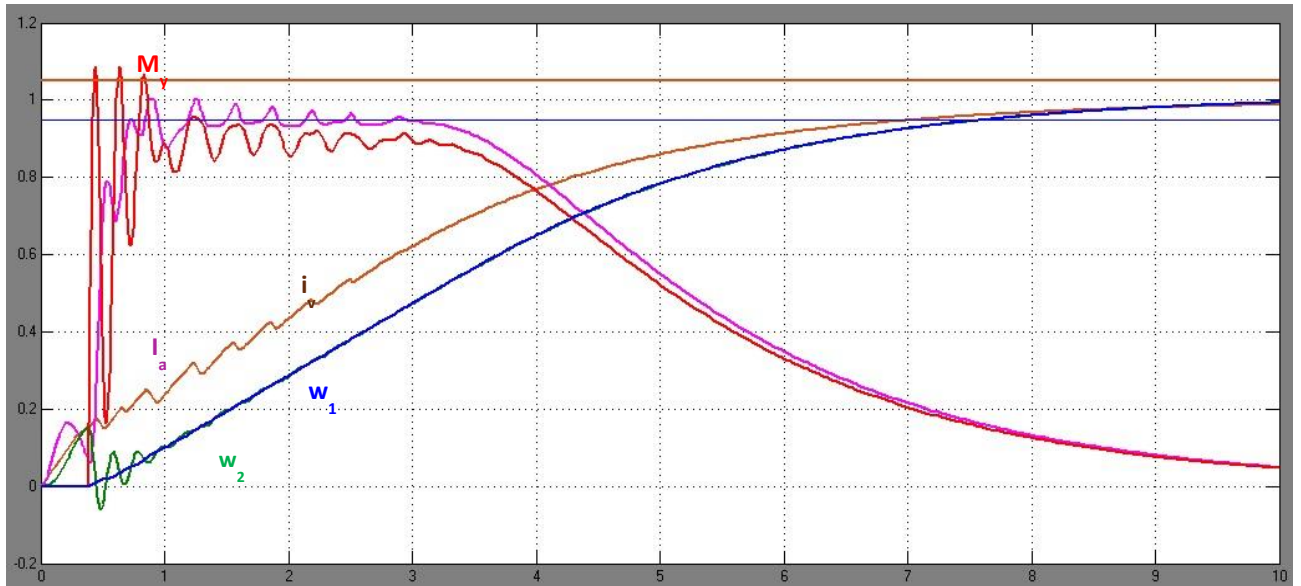


Рисунок Г.1- Характеристика переходного процесса четырехконтурной СПР при $K_f=1$

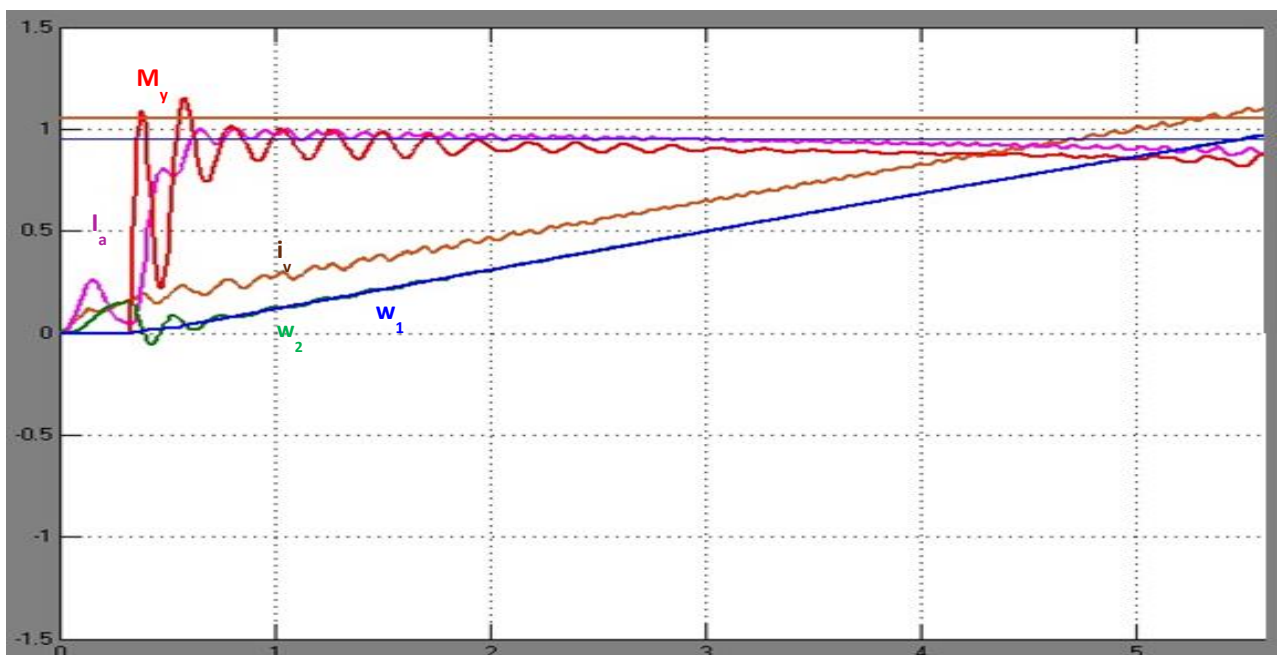


Рисунок Г.1- Характеристика переходного процесса четырехконтурной СПР при $K_f=1$

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Осциллограммы переходных процессов электромеханической системы с пятиконтурной системой подчиненного регулирования

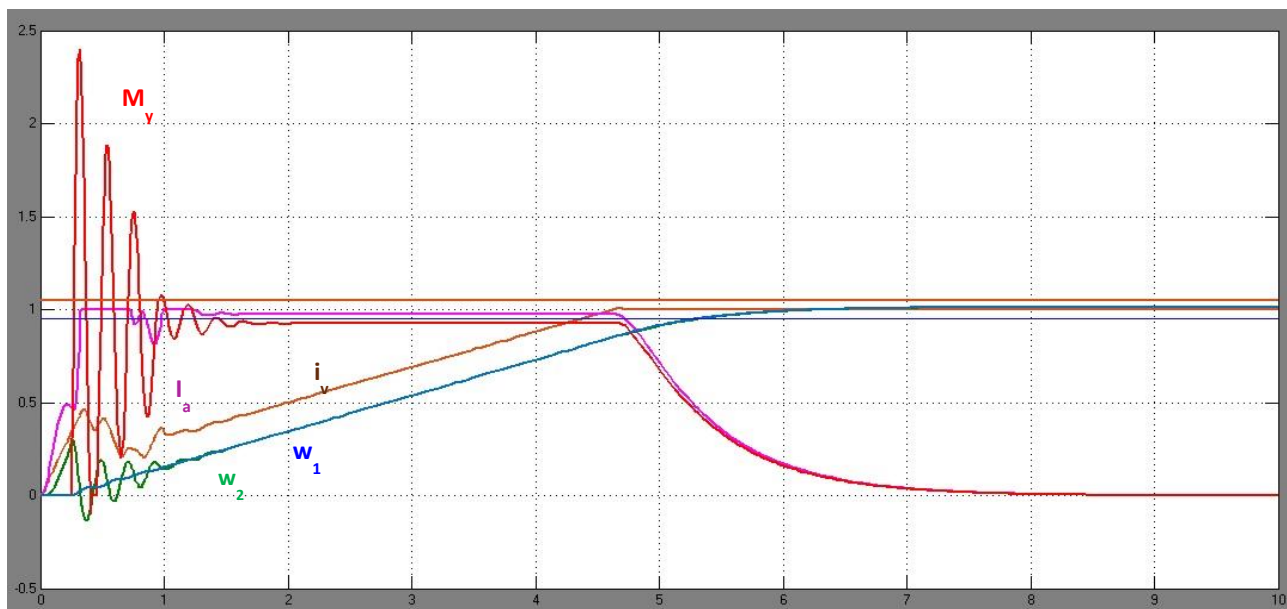


Рисунок Д.1- Характеристика переходного процесса пятиконтурной СПР при $K_f=1$

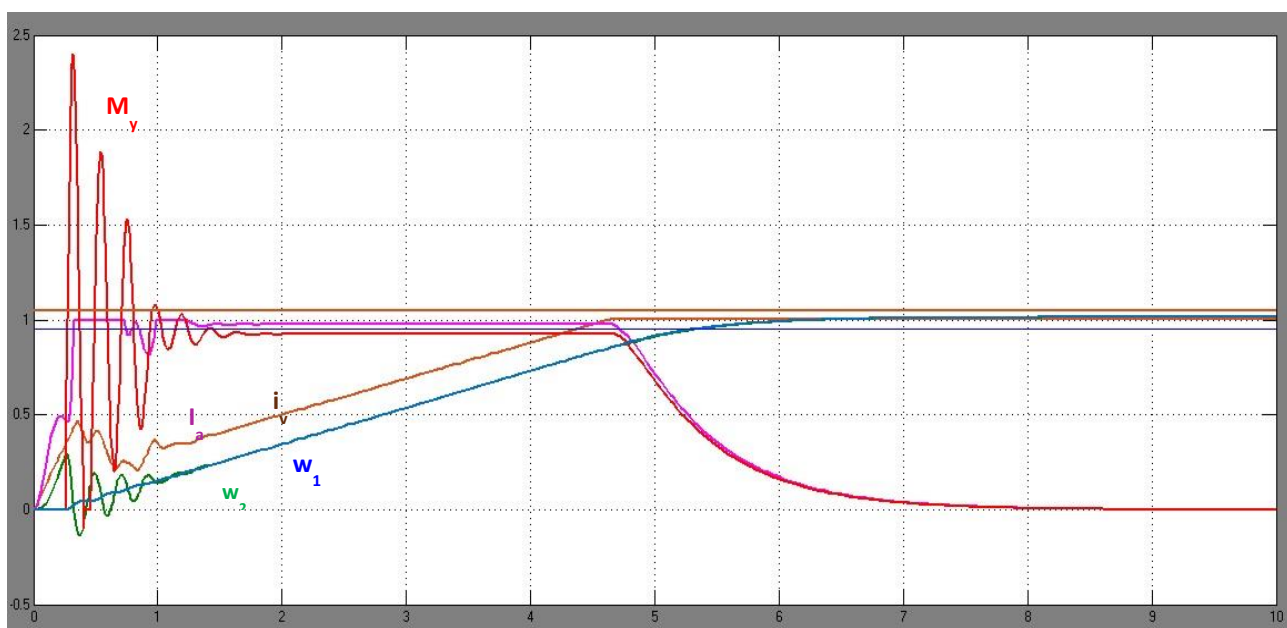


Рисунок Д.2- Характеристика переходного процесса пятиконтурной СПР при $K_f=2$

Бакалаврская работа выполнена мной самостоятельно. Используемые в работе материалы и концепции из опубликованной научной литературы и других источников имеют ссылки на них.

Отпечатано в 1 экземпляре.

Библиография 25 наименование.

« » _____
(дата)

(подпись)

_____Кириченко Е.А.
(ФИО)